

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

_____ Олександр ОХРИМЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-науковою програмою «Технології комп’ютерного конструювання
верстатів, роботів і машин»

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему «Маніпулятор мобільного роботизованого комплексу спеціального
призначення»

Виконав (-ла): студент (-ка) _____ II курсу , групи МВ – 81мн

Бондаренко Наталія Борисівна

_____ (прізвище ім’я по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Струтинський В.Б.

_____ (посада, науковий ступінь тавчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з розділу _____

_____ (посада, науковий ступінь тавчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент:

д.т.н., професор Петраков Ю.В.

_____ (посада, наукова ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ - 2020

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського”
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання верстатів та машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 131 Прикладна механіка

Освітньо-наукова програма «Технології комп'ютерного проектування верстатів, роботів і машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Василь СТРУТИНСЬКИЙ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

_____ Бондаренко Наталія Борисівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації “Маніпулятор мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення”

науковий керівник дисертації д.т.н., професор Струтинський В.Б.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “04” березня 2020 року № 800-с

2. Термін подання студентом дисертації 30.04.2020 р.

3. Об'єкт дослідження Робочі процеси в маніпуляторі мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення.

4. Предмет дослідження Маніпулятор мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Виявлення недоліків існуючого маніпулятора з МПК та створення механізму вдосконалення маніпулятора з МПК. 2. Розрахунок напружено-деформованого стану об'єкта вдосконалення. 3. Підбір полімерного композитного матеріалу для об'єкта вдосконалення та аналіз підібраних рішень. 4. Конструктивні рішення та опис геометричних характеристик об'єкта вдосконалення та аналіз підібраних рішень.

5.Конструктивні рішення перехідних вузлів від композитного матеріалу до металевої структури об'єкта вдосконалення, при конструюванні маніпулятора з МПК та аналіз підібраних рішень. 6.Опис конструкції мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:
1.(A1)Статичний аналіз вихідної рами. 2.(A1)статичний аналіз варіантів рами. 3.(A1) Статичний аналіз остаточного варіанту рами. 4.(A1)Оснастка рами. 5.(A1)Статичний розрахунок накладок. 6.(A1)Оснастка накладок. 7.(A1)Робоча зона маніпулятора роботизованого комплексу.8.(A1)Загальний вигляд роботизованого комплексу. 9.(A1)Креслення рами. 10.(A1)Деталювання накладок. 11.(A1)Деталювання накладок .12.(A2)Внутрішня накладка СК. 13.(A1)Роботизований комплекс СК.

7. Орієнтовний перелік публікацій 1.Патент України №120668 «Крокуючий пристрій мобільного робота». 2.Стаття та тези «Маніпулятор на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами в мобільному роботизованому комплексі спеціального призначення», Конференція «Інновації молоді в машинобудуванні 2019» 5.Тези «Hexapod robot device» Конференція «Інновації молоді в машинобудуванні 2020».

8. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Патент	Юрчишин О.Я.		

9. Дата видачі завдання 15 жовтня 2018

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підбір полімерного композитного матеріалу. Пошук аналогів систем, що працюють за принципом паралельної кінематики.	Жовтень 2018 р.	
2	Обґрунтування геометричних характеристик крокуючих ланок. Експериментальні варіанти виконання крокуючих ланок.	Січень 2019 р.	
3	Оптимізація крокуючої ланки за рахунок використання патенту України на винахід №120668	Вересень 2019 р.	
4	Розроблення перехідних вузлів.	Жовтень 2020 р.	

5	Розроблення оснастки для елементів перехідних вузлів. Розрахунок напружено-деформованого стану елементів перехідних вузлів крокуючих ланок	Грудень 2020 р.	
6	Розрахунок дискретних крокових двигунів.	Січень 2020 р.	
7	Конструктивне рішення схвата. Збільшення робочої зони схвата. Загальний вигляд маніпулятора роботизованого комплексу	Лютий 2020 р.	
8	Оформлення магістерської дисертації	Квітень 2020 р.	

Студент _____ Наталія Бондаренко
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник

_____ Василь Струтинський
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

У магістерській дисертації спроектовано елементи верхньої частини мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення, а саме рами та перехідних елементів, які дають можливість зменшити вагу роботизованого комплексу та підвищити його механічні властивості. Перехідні елементи виконують функцію кріплення механізму паралельної структури до рами роботизованого комплексу. Також проведено підбір матеріалу, при якому оптимальним рішенням стало використання композиційного матеріалу, в якому, армуючими елементами виступає сатинове плетіння скловолокна, а матрицею — епоксидна смола. Виконано проектування оснастки для виготовлення композиційних елементів механізму, а саме рами та перехідних елементів. Виконані розрахунки напрямку волокон структури композиційного матеріалу, також виконано розрахунки напружено-деформованого стану рами та перехідних елементів.

Ключові слова: роботизований комплекс, композиційний матеріал, твердотільна модель, мобільний робот, структура композита.

АННОТАЦИЯ

В магистерской диссертации спроектированы элементы верхней части мобильного роботизированного комплекса специального назначения, а именно рамы и переходных элементов, которые дают возможность уменьшить вес роботизированного комплекса и повысить его механические свойства. Переходные элементы выполняют функцию крепления механизма параллельной структуры к раме роботизированного комплекса. Также проведен подбор материала, при котором оптимальным решением стало использование композиционного материала, в котором, армирующими элементами выступает сатиновое плетение стекловолокна, а матрицей - эпоксидная смола. Выполнено проектирование оснастки для изготовления композиционных элементов механизма, а именно рамы и переходных элементов. Выполнены расчеты направления волокон структуры композиционного материала, также выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния рамы и переходных элементов.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, композиционный материал, твердотельная модель, мобильный робот, структура композита.

SUMMARY

In the master's thesis the elements of the upper part of a special purpose mobile robotic complex, namely frames and transition elements, which allow to reduce the weight of the robotic complex and increase its mechanical properties, are designed. The transition elements perform the function of fastening the parallel structure mechanism to the frame of the robotic complex. The material selection was also carried out, where the optimal solution was the use of composite material, in which the reinforcing elements are satin weave glass fiber, and the matrix - epoxy. The design of equipment for the manufacture of composite elements of the mechanism, namely the frame and transition elements. Calculations of the fibers direction of the composite material structure have been made, as well as calculations of the stress-strain state of the frame and transition elements have been made.

Key words: robotic complex, composite material, solid-state model, mobile robot, composite structure.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1	
1. Виявлення недоліків існуючого маніпулятора з МПК та створення механізму вдосконалення маніпулятора з МПК	5
РОЗДІЛ 2	
2. Розрахунок напружено-деформованого стану об'єкта вдосконалення	
2.1 Проведення аналізу напружено-деформованого стану об'єкта вдосконалення	8
2.2 Розрахунок напружено-деформованого стану МКЕ.....	14
2.3 Конструкція та визначення робочого простору поворотної рами.....	23
РОЗДІЛ 3	
3. Підбір полімерного композитного матеріалу для об'єкта вдосконалення та аналіз підібраних рішень	
3.1 Проведення підбору матеріалу матриці полімерного композитного матеріалу об'єкта вдосконалення.....	28
3.1.1 Використання скловолокна як армуючої складової композиційного матеріалу.....	28
3.1.2 Фізико-хімічні властивості розчинників та методики їх створення.....	33
3.1.3 Використання напівфабрикатів препрег для виготовлення композиційних матеріалів.....	35
3.1.4 Галузі застосування композиційних матеріалів.....	39
3.2 Вибір матеріалу для нового об'єкта вдосконалення	40
3.3 Проведення підбору матеріалу матриці полімерного композитного матеріалу об'єкта вдосконалення	45
3.3.1 Параметри об'єкту винаходу при проектуванні та конструюванні.....	45
3.3.2 Використання прямої та оберненої задач в розрахунках при проектуванні та конструюванні.....	46
3.3.3 Підбір характеристик матеріалів для створення композиційного матеріалу.....	48
3.3.4 Проектування структури волокон композиційного матеріалу.....	54
3.3.5 Оптимальне проектування структури композиційного матеріалу.....	60
3.3.6 Проектування структури композита при складній схемі армування...67	
3.3.7 Проектування структури композиційного матеріалу за критерієм максимальних напружень.....	71
3.3.8 Проектування структури композита при умові декількох схем прикладення навантаження.....	78
РОЗДІЛ 4	

4. Конструктивні рішення та опис геометричних характеристик об'єкта вдосконалення та аналіз підібраних рішень	
4.1 Проведення підбору профіля поперечного перерізу об'єкта вдосконалення	86
4.1.1 Розрахунок напружено-деформованого стану циліндричної рами.....	87
4.1.2 Розрахунок напружено-деформованого стану пірамідоподібної рами.....	91
4.1.3 Розрахунок напружено-деформованого стану рами внутрішньої поверхні тора.....	95
4.1.4 Розрахунок напружено-деформованого стану рами зовнішньої поверхні тора.....	99
4.2 Проведення підбору оптимального рішення поверхні рами роботизованого комплексу спеціального призначення.....	103
РОЗДІЛ 5	
5. Конструктивні рішення перехідних вузлів від композитного матеріалу до металевої структури об'єкта вдосконалення, при конструюванні маніпулятора з МПК та аналіз підібраних рішень	
5.1 Розроблення композиційних накладок та фрикційних перехідних пластинок для кріплення МПК до рами роботизованого комплексу спеціального призначення.....	107
5.2 Аналіз композиційних накладок для кріплення МПК до рами роботизованого комплексу спеціального призначення.....	124
РОЗДІЛ 6	
6. Реалізація процесу виготовлення композиційних рами та накладок роботизованого комплексу спеціального призначення	
6.1 Розробка оснастки для виготовлення композиційної рами роботизованого комплексу спеціального призначення	128
6.1.1 Метод вакуумного формування виробів із композиційних матеріалів.....	129
6.1.2 Метод запікання в автоклаві виробів із композиційних матеріалів.....	137
6.2 Розробка оснастки для виготовлення композиційних накладок для рами роботизованого комплексу спеціального призначення	140
РОЗДІЛ 7	
7. Опис конструкції мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення.....	143
ВИСНОВКИ.....	148
ЛІТЕРАТУРА.....	150

ВСТУП

Зазвичай ми не помічаємо, наскільки сучасні технології проникли в наше життя. Щодня ми користуємося транспортом, гаджетами, апаратами мобільного та супутникового зв'язку, персональними комп'ютерами — все це стало невід'ємною складовою нашого життя в сучасному світі. Саме технічний прогрес задає правила для життя людини, що проживає в ХХІ столітті.

Сучасна середньостатистична людина зобов'язана вміти користуватися різноманітними механізмами для того, щоб мати змогу залишатися серед суспільства та спокійно існувати.

Рівень вмінь користування тими чи іншими механізмами, що є наслідком впливу технічного прогресу, досить часто визначають рівень затребуваності людини, як спеціаліста та, відповідно, диктують рівень заробітку та умови життя для неї, в той час, як на рівень успішності країн впливає її воєнне забезпечення та незалежність від зовнішніх ресурсів.

Політика кожної розвинутої країни завжди була спрямована на збереженні людського здоров'я та життя. Тому, досить часто для виконання важких та небезпечних задач використовуються різноманітні механізми. Для виконання завдань на різних позиціях, варто використовувати мобільні роботизовані механізми.

Також, важливою характеристикою механізму, окрім мобільності, є його універсальність. Чим більше він універсальний, тим більше різнотипових задач він зможе виконати.

На універсальність механізму впливають його габарити та характеристики. Наприклад, чим менші габарити і вага механізму, тим зручніше працювати в приміщенні із обмеженою зоною дії та зручніше його транспортувати та. Також, зі зменшенням ваги, зменшуються навантаження на підтримуючі опори.

Для зменшення ваги сучасні конструктори використовують сучасні матеріали, наприклад такі, як композиційні матеріали.

Метою магістерської дисертації стала оптимізація рами роботизованого комплексу спеціального призначення.

Для досягнення мети, перед нами поставлені наступні задачі: зменшення ваги та зміцнення рами роботизованого комплексу спеціального призначення.

Проектування нової рами створить умови для подальшої модернізації роботизованого комплексу спеціального призначення. Наприклад, зменшивши її вагу в порівнянні з попереднім варіантом рами та зміцнивши її, ми зможемо модернізувати установку, встановивши механізм переміщення рами, що забезпечить мобільність роботизованого комплексу спеціального призначення.

РОЗДІЛ 1

ВИЯВЛЕННЯ НЕДОЛІКІВ ІСНУЮЧОГО МАНІПУЛЯТОРА З МПК ТА СТВОРЕННЯ МЕХАНІЗМУ ВДОСКОНАЛЕННЯ МАНІПУЛЯТОРА З МПК

Конструкція поворотної рами робототехнічного комплексу, що була спроектована для дипломної роботи бакалавра мала ряд недоліків, які не задовільняли в повній мірі наші потреби. Недоліками стали великі габарити конструкції, неуніверсальність конструкції, велика вага та складність процесу зборки.

Тому для оптимізації конструкції було вирішено замінити стару раму на нову (рис.1.1).

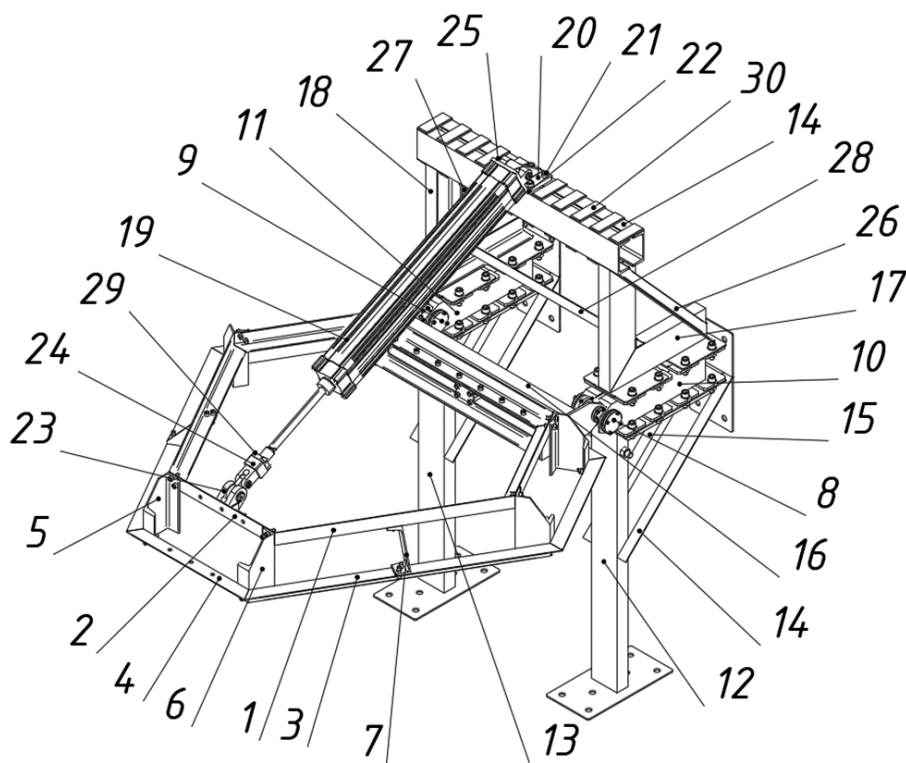


Рис.1.1. Конструкція поворотної рами роботомеханічного комплексу.

Конструкція передньої рами робототехнічного комплексу утворюється двома поясами, які представлені набором шестикутників із сортаменту (кутник $\angle 50 \times 50$). Верхній пояс складається із трьох граней 1, що є довгими та трьох коротших 2 із кутника $\angle 50 \times 50$. Обидва пояса з'єднані стойками 5, 6 і 7 (швелер [12U-160]).

Вага попередньої рами становила майже 40 кілограм. (рис.1.2). Це становило ряд незручностей для обслуговуючого персоналу, що займався її збіркою. Також вага негативно впливала на модернізацію установки вцілому.

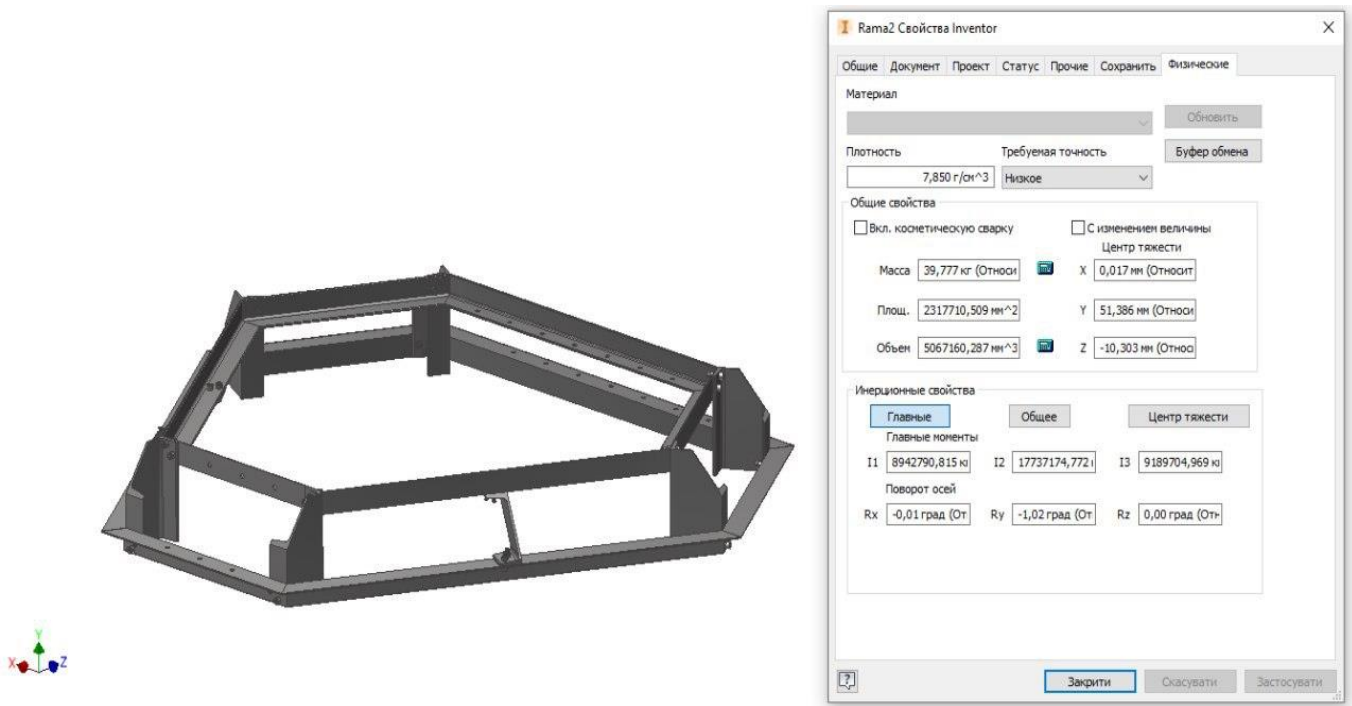


Рис.1.2. Рама робототехнічного комплексу спеціального призначення

Конструкція рами робототехнічного комплексу складалася з 18 окремих елементів, що з'єднувалися між собою зварюванням (в поясах) та кріпильними елементами стійками між поясами. Це істотно затруднювало процес зборки даної рами для робототехнічного комплексу спеціального призначення.

На раму робототехнічного комплексу у нашому випадку діють ряд навантажень. Це навантаження від ваги штанг змінної довжини, сервоприводів, схвата маніпулятора та гіроскопічних рамок. Також присутня дія ваги на раму від роботи пневмoeлемента. При активації пневмoeлемента, навантаження передаються на вухо, яке в свою чергу його передається на раму і вона починає згинатися. Прикладені навантаження найбільше впливають на різноманітні концентратори напружень. У рамі робототехнічного комплексу спеціального призначення найчастіше

концентраторами напружень виступають зварні шви та місця кріплень. Тому зменшення кількості зварних швів та місць кріплень призведе до зменшення кількості потенційно небезпечних ділянок рами.

Вирішенням стало створення нової рами робототехнічного комплексу спеціального призначення.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА ВДОСКОНАЛЕННЯ

2.1 Проведення аналізу напружено-деформованого стану об'єкта вдосконалення

Для визначення навантажень на раму проводили розрахунок, основні сили і тиск, які накладаються на площини рами, на котрих розташовані установки з сервомоторами. Сили розкладається на горизонтальні і вертикальні компоненти (рис. 2.1.1).

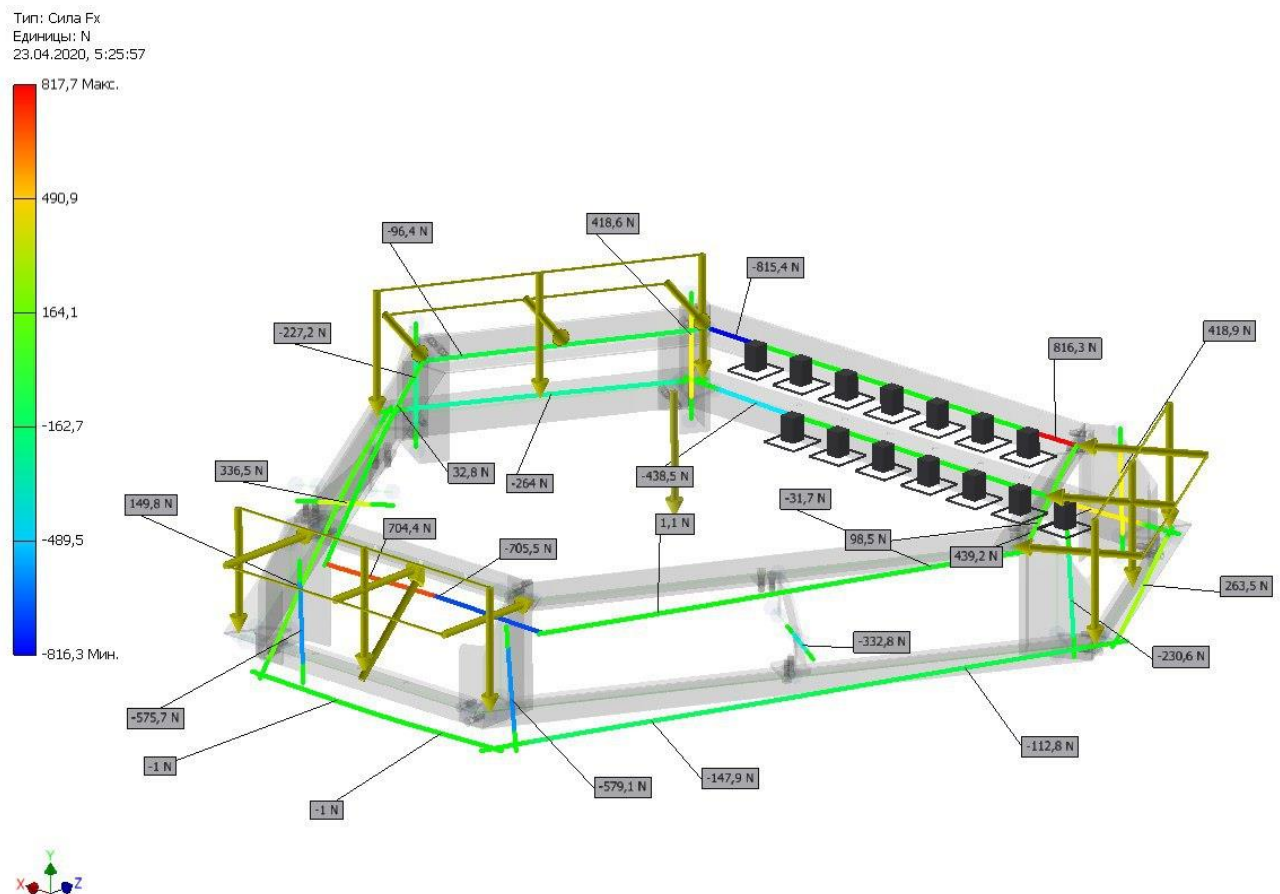


Рис.2.1.1. Навантаження рами відносно осі X

Сила, що діє з боку штока циліндра та прикладається до верхнього поясу, імітує навантаження, що призводить до зміщення середньої частини. Зовнішня сила додатково прикріплена до рами, щоб зімітувати реакції від переміщення гвинтових пар, важелів, встановлює рух головного інструменту, схвата, який з'єднаний з шістьма важелями, які збільшують ступінь свободи від 3 до 6. Її встановлюють на верхньому поясі на середині

другої ланки, під місцем, де кріпиться кронштейн. Враховувалася також сила тяжіння, яка діє у вертикальному напрямку. Оскільки ми тільки моделюємо каркас, виключаючи всі інші фактори, то ми беремо точки опори як місце кріплення, де верхня і нижня частини рами, прикріплені до поворотної рами. Є 14 загальних точок кріплення. Тому ми беремо однакову кількість точок опори і в моделюванні.

Ділянки, які найбільш навантажені вздовж осі X, це частини верхнього поясу рамки (див. рис. 2.1.2). Показано дві основні області. На відрізку, від місця першого кріплення рами до зварного шва, болтових отворів, а також на місці монтажу кронштейна, близько 815 Н. Стійки між поясами менш навантажені, 490-450Н. Ті ж навантаження сприймають ті стійки, які розташовані поблизу кріплення кронштейна. На всі інші області діють навантаження не більше 160 Н.

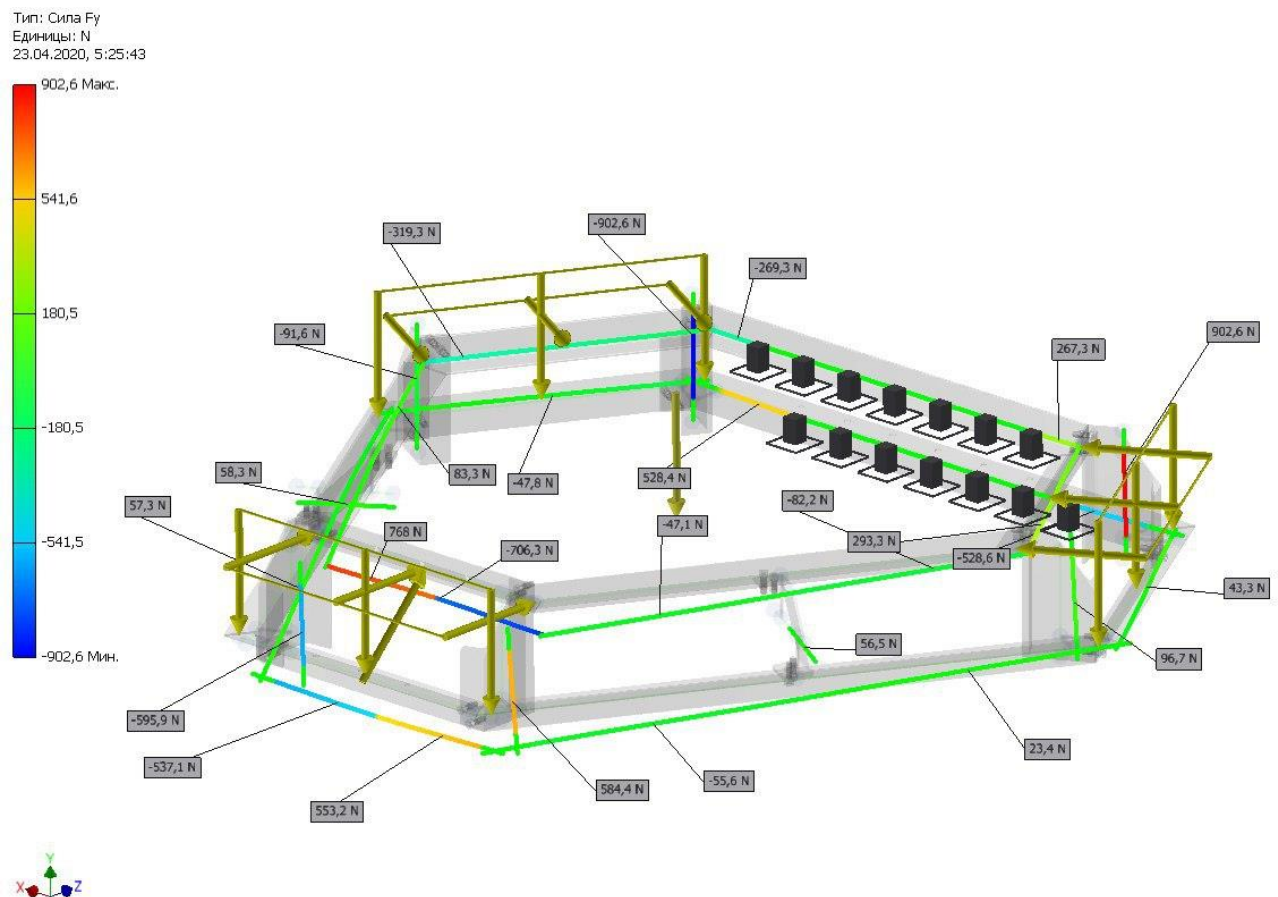


Рис.2.1.2 Навантаження рами відносно осі Y

Найбільші навантаження вздовж осі Y на стійках між нижньою і верхньою частинами рами, що знаходяться ближче до точки закріплення рами, перевищують 900 Н (рис. 2.1.3). Кронштейн менш завантажений, 900-850 Н. Найменш навантажені ділянки - це стійки, розташовані біля кріплення кронштейна, а також нижня частина рами - 540 Н. Всі інші ділянки не сприймають значних навантажень, близько 180 Н.

Найбільші навантаження спостерігаються вздовж осі Z (рис 2.1.4). Це секції верхнього і нижнього поясів, розташовані на місці кріплення рами, в районі 1000 Н. Стійки, розташовані на згаданих ділянках, менш навантажені, а стійки на місці кріплення кронштейна найменш завантажено. Такий самий ступінь навантажених ділянок верхнього і нижнього поясів знаходяться на протилежній стороні від місця кріплення рами, в діапазоні 500-600 Н. Менш навантажені ділянки являють собою верхній і нижній рами, показані жовтим і оранжевим кольорами. Навантаження становить не більше 500 Н. Мінімальні навантаження становлять 200 Н.

Аналіз показує, що найбільш навантаженою є вісь Z , стискаючі навантаження. Рама, незважаючи на це, витримує такі навантаження, оскільки вони сприймають незначні величини. Навантаження відповідає величині 1 кН, прикладеної сили, як зовнішнє навантаження.

Тип: Сила Fz
 Единиця: N
 23.04.2020, 5:25:24

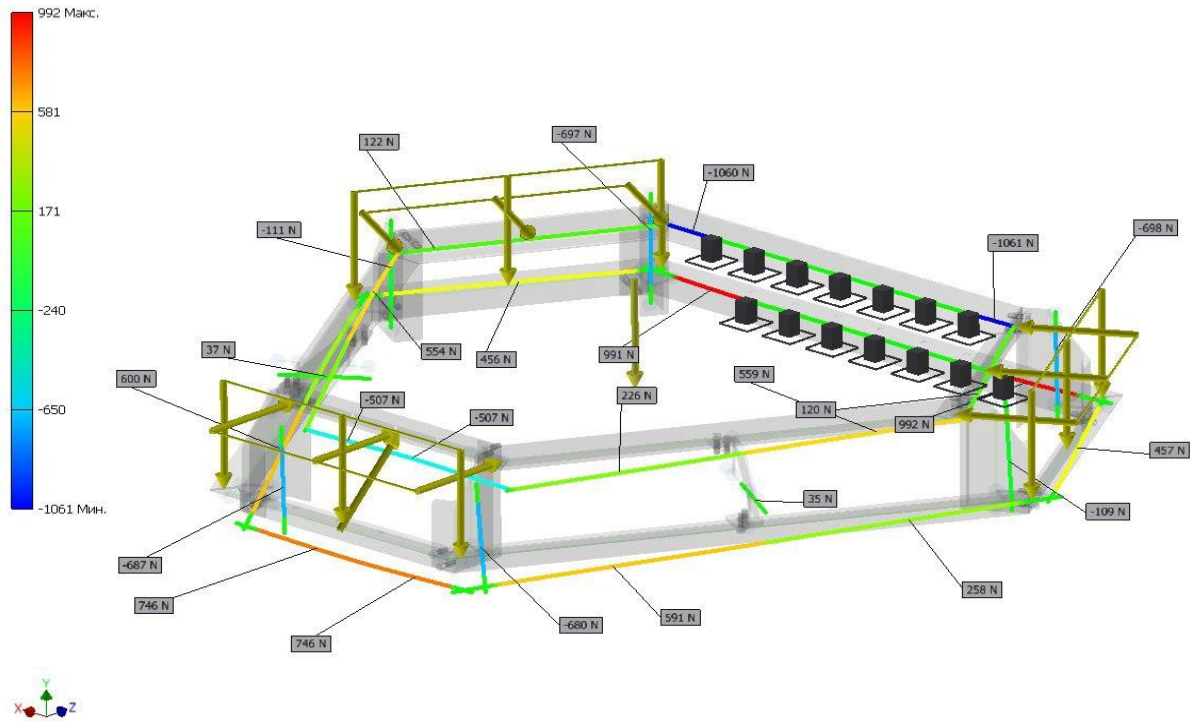


Рис. 2.1.3. Аналіз навантажень для Z

Стосовно аналізу моментів по вісі X, то вони змінюються по довжині ланки (рис. 3.8).

Тип: Момент Mx
 Единиця: N мм
 23.04.2020, 5:25:01

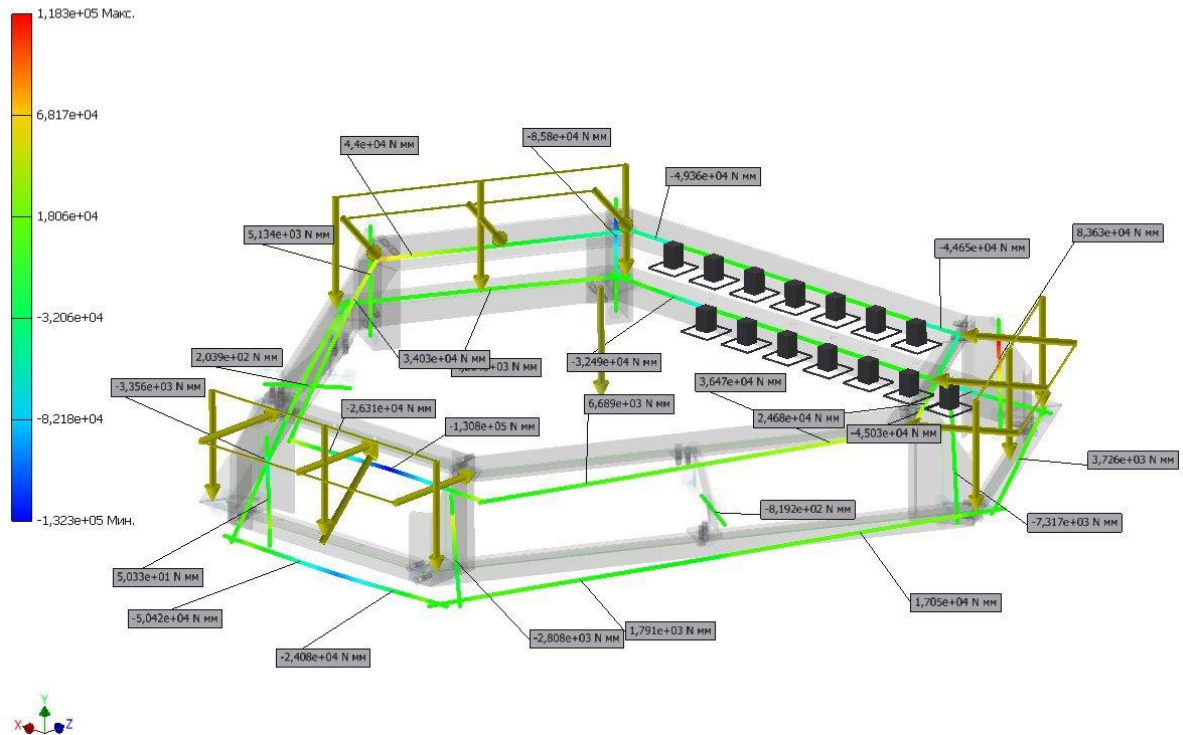


Рис. 2.1.4. Аналіз моментів, що спроектовані по осі X

Найбільші навантаження спостерігаються на стійках між верхньою і нижньою частинами рами, які розташовані поблизу точки кріплення рами. Менші навантаження спостерігаються в місці кріплення кронштейна і на нижній частині рами. Інші області сприймають малі напруги, приблизно $2 \cdot 10^4$ Н·мм.

Всі навантаження вздовж осі X змінюються від $1,2 \cdot 10^5$ Н·мм до $1,2 \cdot 10^4$ Н·мм в додатному напрямку, а від $1,3 \cdot 10^5$ Н·мм до $3,2 \cdot 10^4$ Н·мм з від'ємним знаком.

На осі Y навантаження трохи менше, але кількість областей, які сприймають навантаження, значно більше (рис. 2.1.5). Це області поясів в місці кріплення рами і швелери, які безпосередньо наближаються до місця кріплення. Це навантаження, які не перевищують $7 \cdot 10^4$ Н·мм з від'ємним знаком. Але найбільші величини навантаження сприймаються в місці кріплення кронштейна і швелера. Нижній каркас цієї області сприймає невеликі навантаження, в районі $1,5 \cdot 10^4$ Н·мм. Стійки сприймають навантаження, що змінюється від $1 \cdot 10^5$ Н·мм до $5 \cdot 10^4$ Н·мм. Навантаження, які сприймають довгі ланки верхнього поясу і нижнього, менші. В основному, це місце, де кріпляться довгі ланки зі стійками. Невеликі навантаження на ці ланки, посередині, де закріплені верхній і нижній пояси. Найбільші навантаження на ці стійки ближче до точки закріплення рами, такі як $4 \cdot 10^4$ Н·мм. Ті ж самі навантаження беруть на себе нижні ланки верхніх і нижніх частин поясів, на яких встановлюється установка з стійками, які розташовані поблизу місця кріплення рами та основи. Це пов'язано з тим, що сила тяжіння, що діє на каркас, зосереджена в місцях, що найбільш віддалені від центру мас. Слід зазначити, що цей ефект не спостерігається на третьої площині, де кріпиться вузол, оскільки всі навантаження сприймаються пневмоприводом, який, передає кронштейну і ланці, на яку він прикріплений, безпосередньо з'єднаний з стійками каркасу.

Тип: Момент M_y
 Единиці: N·mm
 23.04.2020, 5:24:34

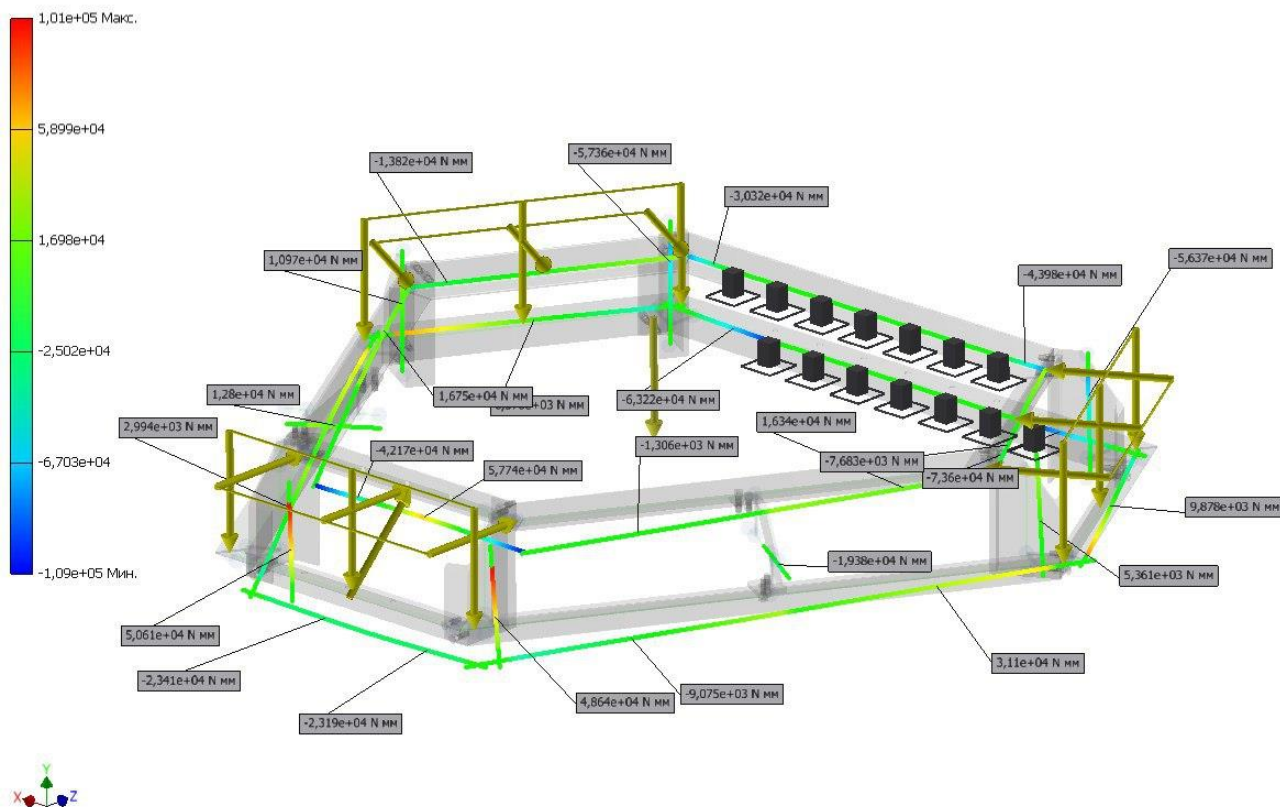


Рис.2.1.5. Аналіз моментів виконаний по осі Y

Найменший з моментів ми спостерігається по осі Z (рис. 2.1.6). Найбільші навантаження ми можемо побачити на чотирьох стійках, дві з них, розташовані поруч з позицією кріплення, а дві інші утримують нижню і верхню зони рами, де розташовані серводвигуни. Ці значення знаходяться в діапазоні від 3700 Н·мм до 3400 Н·мм в від'ємному і додатному напрямках. Всі інші частини не отримують великих навантажень. Вони не перевищують значення 800 Н·мм з позитивним і негативним знаком. Зверніть увагу, що цей напрямок моментів не робить істотного впливу на установку. Так як всі рухи будуть відбуватись по осях X і Y. Ще однією причиною таких результатів є надзвичайно висока жорсткість конструкції в цьому напрямку, тому що опора рами перпендикулярна цій осі.

Тип: Момент Mz
Единиці: N mm
23.04.2020, 5:23:12

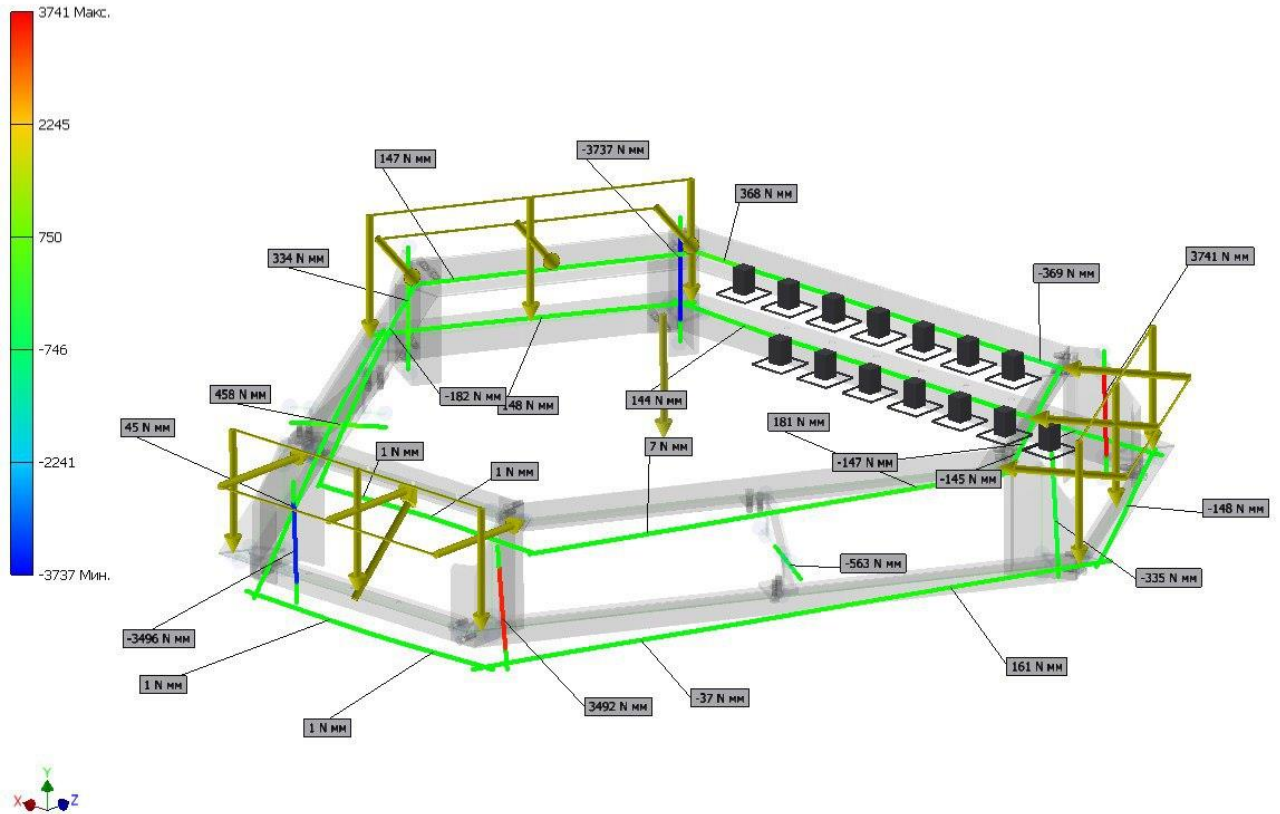


Рис.2.1.6. Аналіз крутного моменту розроблений на осі Z

При роботі на установці створюються зовнішні напруги, які створюють напружено-деформований стан в рамі установки. установка розраховується методом стрижневий апроксимації. Результати аналізу підтверджують, що установка витримує навантаження, прикладене до неї.

2.2 Розрахунок напружено-деформованого стану МКЕ

Перед черговим етапом розрахунку постало завдання визначення переміщень установки стійка-рама. Оскільки від переміщення значною мірою залежить похибки установки, ми повинні їх зробити якомога меншими. Вимірювання проводилися з компонентом сили поршня (рис.2.2.2) і без нього (рис. 2.2.1).

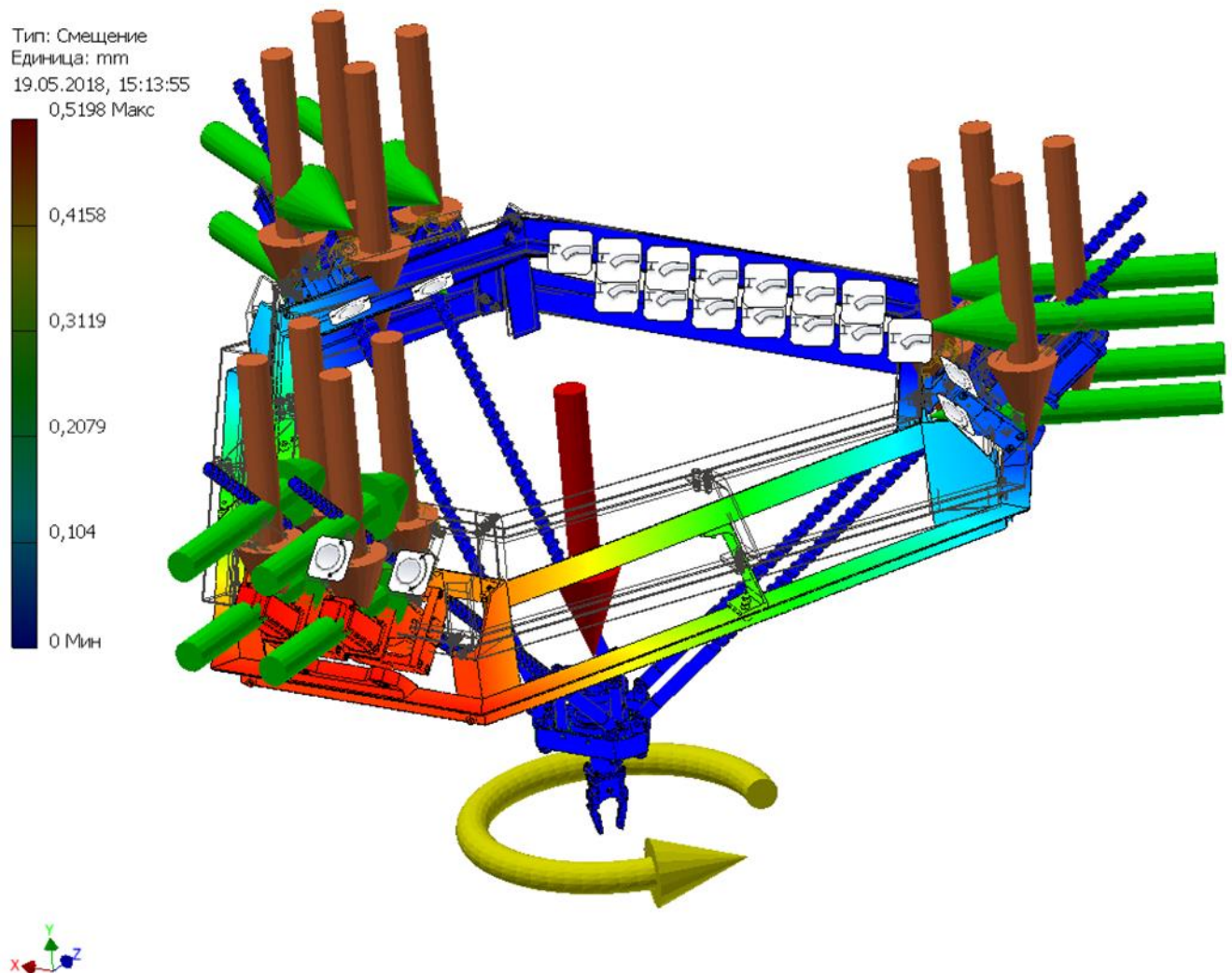


Рис. 2.2.1. Зміщення по осі Y без урахування дії приводу

Установка фіксується так само, як і в попередньому випадку. 14 точок кріплення відповідають з'єднанню рами з установкою з гвинтовими парами та з частиною допоміжної конструкції. Установка включає в себе платформу, до якої кріпиться схват, і 6 стрижнів що забезпечують переміщення підставки і вниз за допомогою кінематичної пари «гайка-гвинт». Частина номер два пари, розміщена в "сідлі", яке прикріплено до верхньої опори установки, являє собою призматичну частину з квадратним отвором в центрі, який утримує "сідло" гайки двома пальцями, які до призматичної частини і до "сідла" по обидва боки від нього. Призматична частина складається з чотирьох попарно ідентичних призм, які з'єднані між собою болтами. Така конструкція дозволить забезпечити один ступінь свободи і накласти зв'язки на інші п'ять.

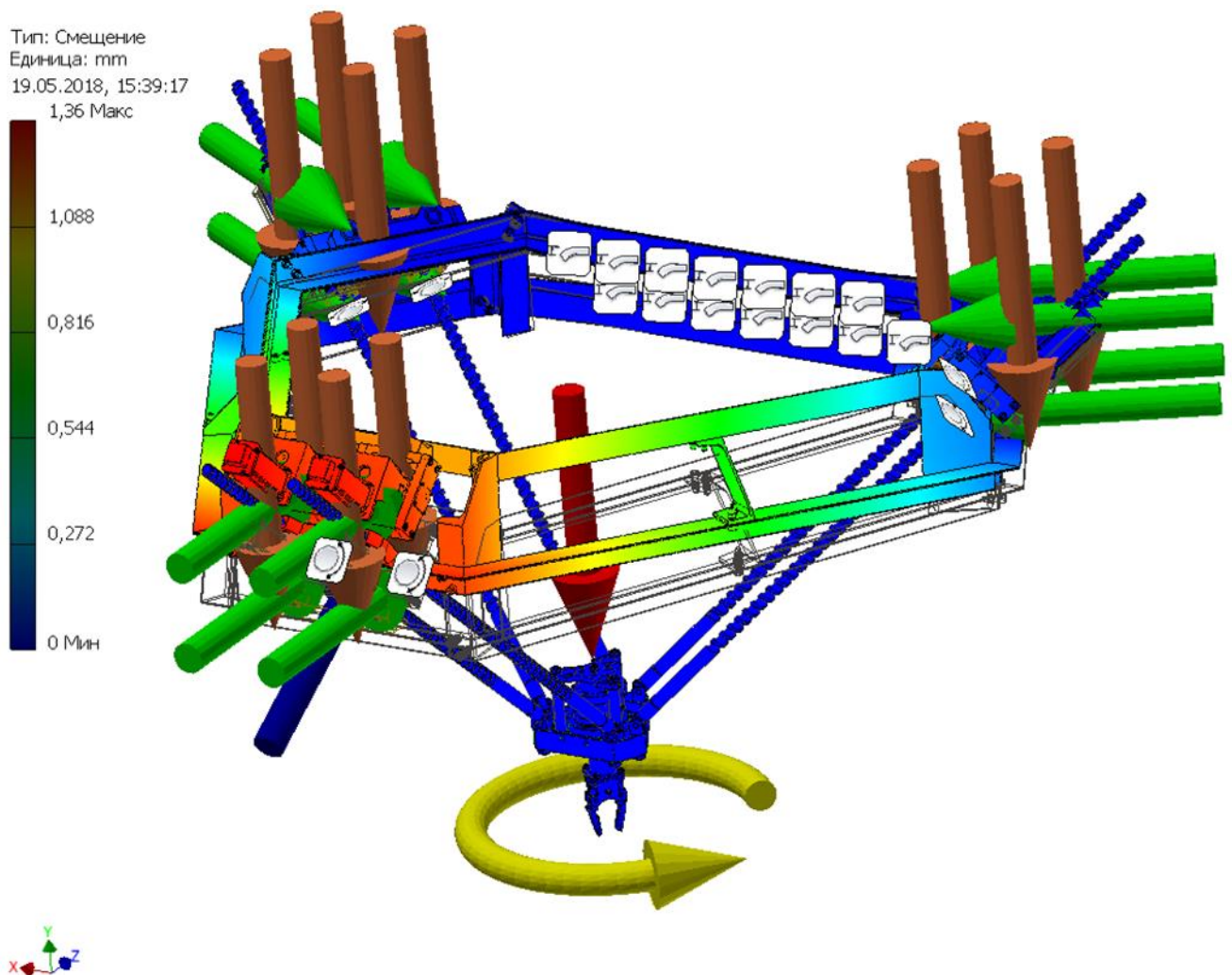


Рис.2.2.2. Зсув по осі Y з силою дії приводу

У «сідлі» є: гайка, утворює кінематичну пару «гвинтової гайки» з гвинтовою підставкою, кріпиться до платформи, адаптер з'єднує гайку зі сталевим шківом, який передає момент від серводвигуна. Гайка і адаптер з'єднані між собою болтами. Зовні в "сідло" встановлена вигнута металева пластина П-подібної форми, з широкою середньою частиною, на якій встановлений, власне, сервомотор. На кінці ротора закріплюють шків, який з'єднується з шківом, який розташований в "сідлі" за допомогою гнучкого ремня, який передає момент від серводвигуна до гайки. На кінцях штифтів, які містять вузол "сідла", встановлені бронзові втулки для зменшення коефіцієнта тертя між пальцями і елементом гіроскопічної установки. У свою чергу, верхня опорна частина установки з'єднана з зовнішньою опорою частиною установки, вона складається з двох призматичних частин,

які прикріплені до верхньої і нижньої рами установки болтовим з'єднанням під кутом, забезпеченим фрезерованою монтажною поверхнею, а зсередини гіроскопічної установки, за допомогою штифтів забезпечують нам тільки одну ступінь свободи, обертання, на якій встановлені бронзові втулки щоб зменшити коефіцієнт тертя.

Для напружено-деформованого стану було змодельовано ситуацію, в якій на робочий інструмент і його платформу діє сила, яка відповідає реакції дії схвата на частину, і крутний момент, який спостерігається при русі маніпулятора, повернутого під певним кутом. Тиск також додавали до площин, на яких прикріплені установки гіроскопу і гвинтові пари. Тиск відповідає навантаженням на площину закріплення від проведених в рух гвинтових пар за допомогою серводвигунів. Гвинти були закріплені, імітуючи жорстке з'єднання пари "гайка-гвинт".

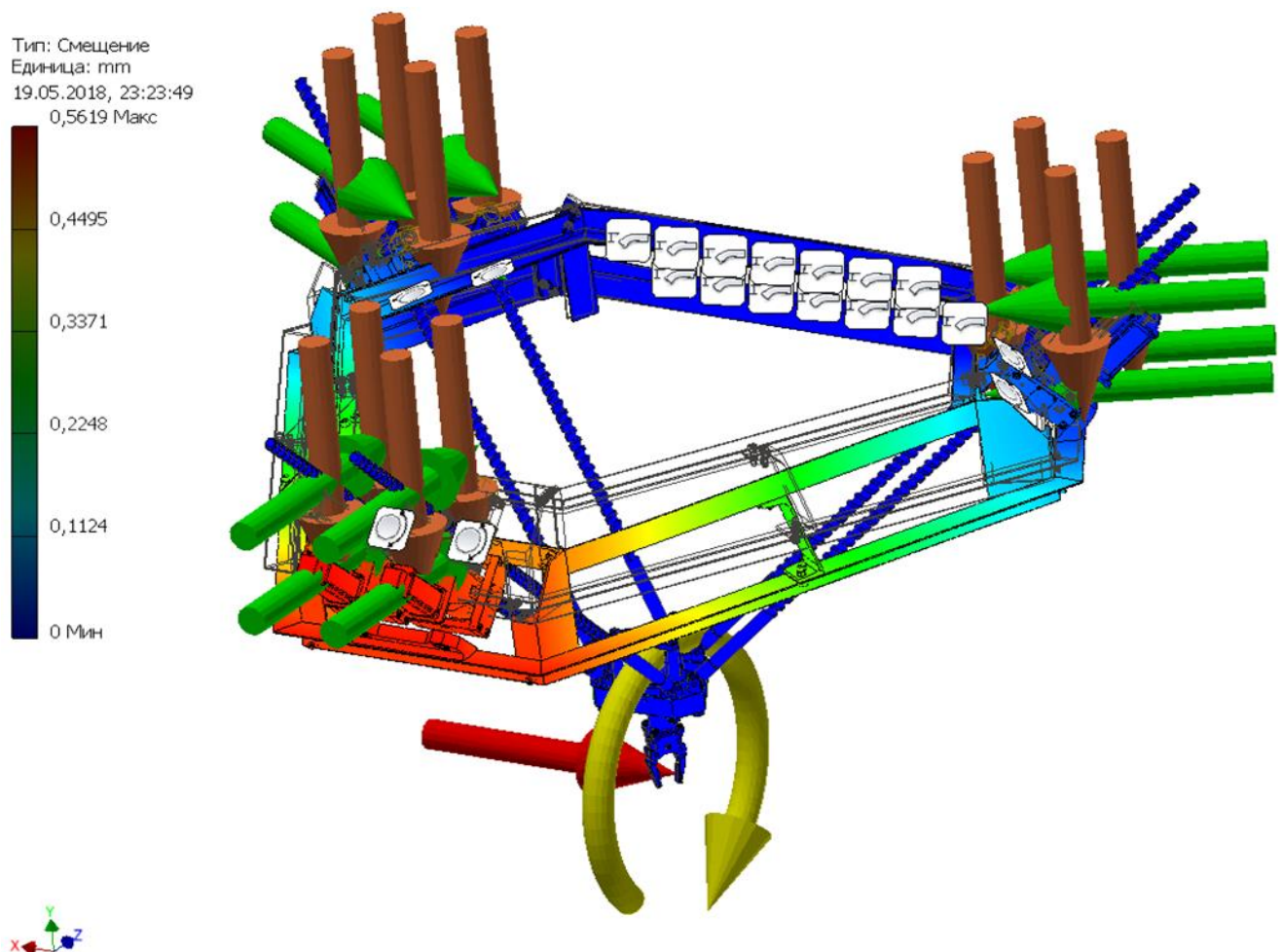


Рис. 2.2.3. Зміщення від дії навантажень по вісі X

На малюнку, на якому показано переміщення без ефекту сили циліндра, ми бачимо, що більше відхилення спостерігається в частині рами, що найбільш віддалена від точки закріплення (рис. 2.2.3). Це секція рами, де розташовані ланки 2 і 4, і стійки 5 і 6, які утримують верхній і нижній пояси рами разом. Максимальне зміщення без дії компонентної сили циліндра становить 0,58 мм. Необхідно звернути увагу на напрямок переміщення рами. Рама зміщується вниз. При моделюванні з дією компонента сили циліндра, рама зміщується вгору. Зсув від компонента від дії сили циліндра становить 1,36 мм, що є достатньо великим значенням для нашої установки. Це значення можна компенсувати, а саме відрегулювавши установку. Оскільки гвинтові пари в цьому моделюванні закріплені між собою, і фіксують їх аксіально, вони не піддаються впливу сил, прикладених до рами установки. Навантаження, які вони сприймають, зосереджено в кінці інструмента.

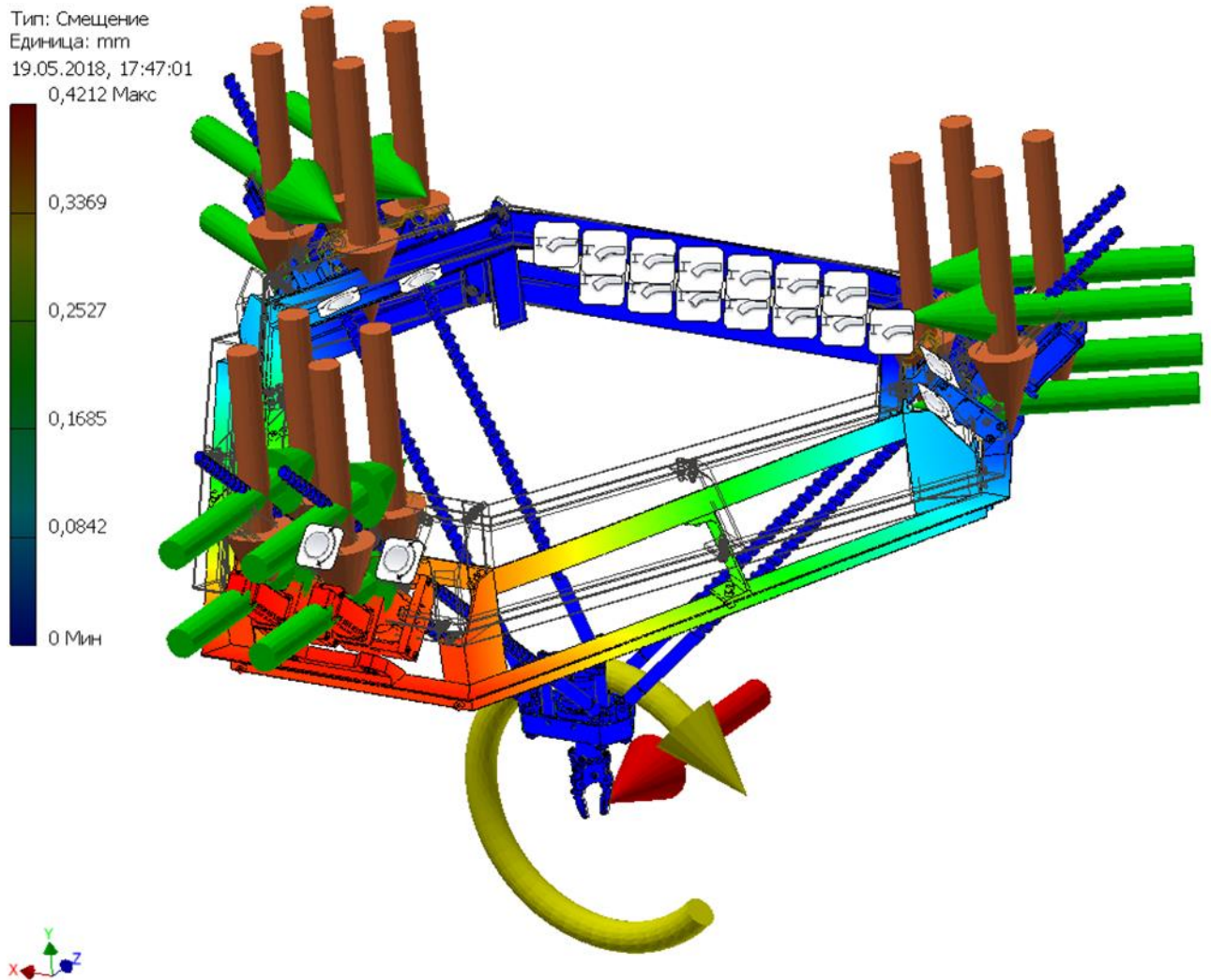


Рис. 2.2.4. Зміщення від навантаження по осі Z

Аналізуючи результати розрахунків, впливає, що гвинти і маніпулятор мають мінімальні переміщення. Але зазначимо, що гвинтові стійки з'єднано з гайками, які утворюють один з одним кінематичні пари, які кріпляться на установках типу гіроскоп, в свою чергу, з'єднані з рамою комплексу. Тобто переміщення, що працюють на рамі, також впливають на гвинтові пари і дають додаткову похибку при обробці певної деталі. Шляхом моделювання навантажень, що діють на установку вздовж осі X, до маніпулятора застосовується сила, у напрямку осі X, яка характеризується реакцією від дії захоплювача на частину, і моментом кручення, що спостерігається, коли маніпулятор повертається під певним кутом. У цьому випадку зміщення велике, оскільки результуюча сила більша, ніж у попередньому випадку. А зміщення по осі Z від дії навантажень менше

(рис.2.2.4). Шляхом моделювання навантажень, що діють на установку вздовж осі Z, до маніпулятора застосовується сила, у напрямку осі Z, яка характеризується реакцією від дії схвата на деталь, і крутний момент, що спостерігається, коли маніпулятор повертається під певним кутом. Це пов'язано з тим, що результуюча сила спрямована в протилежному напрямку від центру установки. У цьому випадку установка працює в основному при розтягу-стиску, а не на вигин. Переміщення в цьому випадку невелике, становить всього 0,42 мм. Розглянемо випадок, коли на установку впливають всі три компоненти навантаження X Y і Z (рис .2.2.5). Як і очікувалося, максимальне переміщення рами в цьому випадку і складає близько 0,7 мм. На установці діють навантаження у всіх трьох напрямках. Це сили, що імітують роботу з інструментом розміщеними під кутом до вертикалі. Всі три сили застосовуються до маніпулятора. Також до маніпулятора застосовуються крутні моменти, які відповідають основному руху, обертання інструменту, що закріплений на платформі. Всі три крутні моменти прикріплені до двох ланок, що розташовані на схваті.

Слід зазначити, що при моделюванні вздовж осей X Y і Z без впливу сили на компонент циліндра зміщення менше, ніж у випадку, коли він застосовується. Але у випадку дії силової складової циліндра можна вводити коригувальні похибки в розрахунках кутового переміщення установки. Хоча в інших випадках немає. Тому краще відрегулювати хід циліндра до необхідного значення.

Також, необхідно звернути увагу на те, що в даний час коригувальні елементи з профілю прикріплені до блоку, які прикріплені до ланок 2 і 4 і до площини, на якій розташований експериментальний стенд. Крім того, для надійності конструкції, на кінцях ланки 2 прикріплені дві кардани, що з'єднують її з рамою пристрою. Це виключає значну ступінь помилки, що виникає в процесі установки.

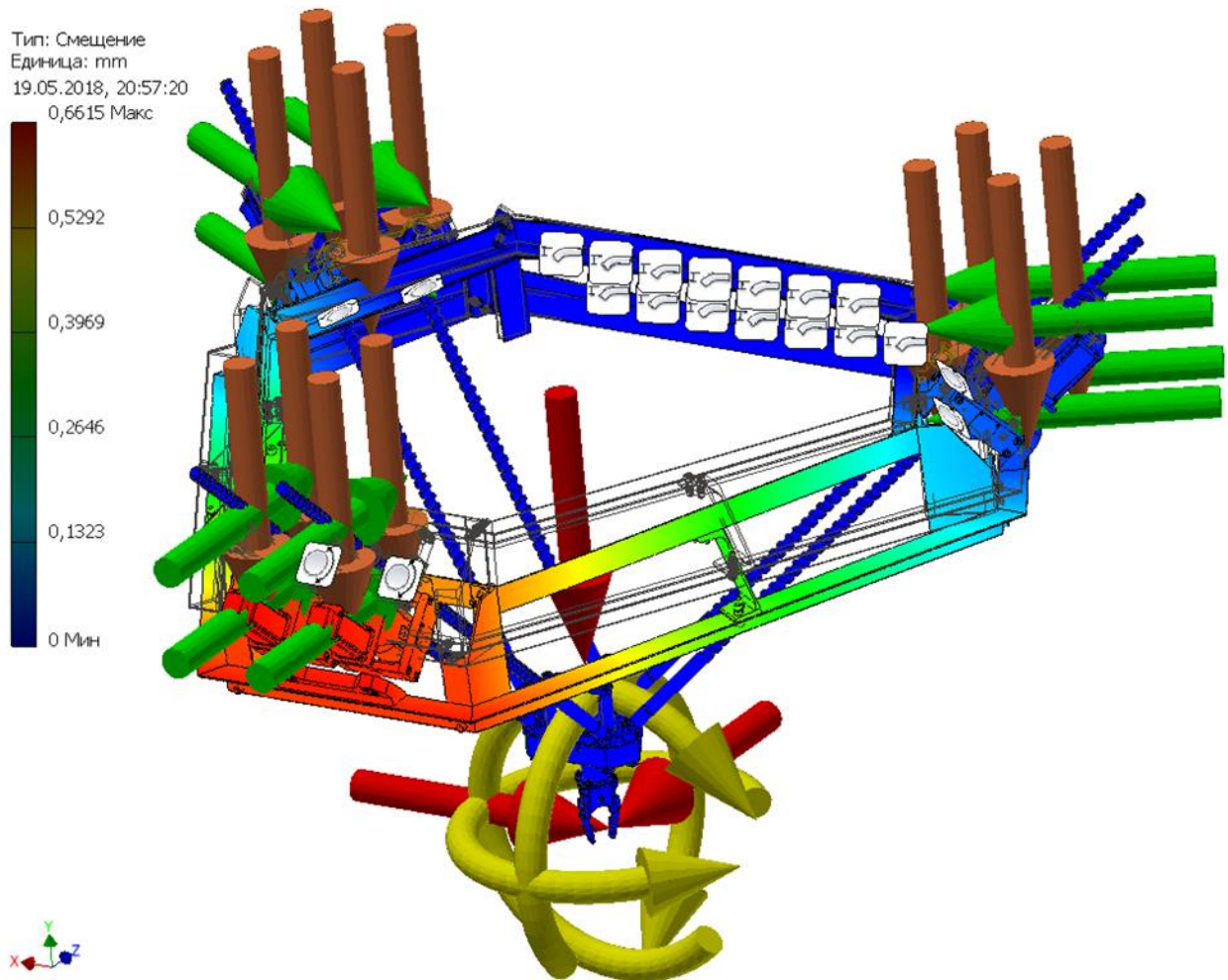


Рис. 2.2.5. Зсув від навантаження по осі XYZ

Висновки: Установка, що складається з рами і маніпулятора і шести гвинтових пар, має незначні переміщення без дії силової складової пневмоприводу та має малі навантаження. При дії компонента приводного зусилля зміщення значно зростає до 1,5 мм. Ця помилка може бути вирівняна шляхом регулювання пневматичних елементів.

2.3 Конструкція та визначення робочого простору поворотної рами

У проекті розроблено поворотну раму роботомеханічного комплексу (рис. 2.3.1).

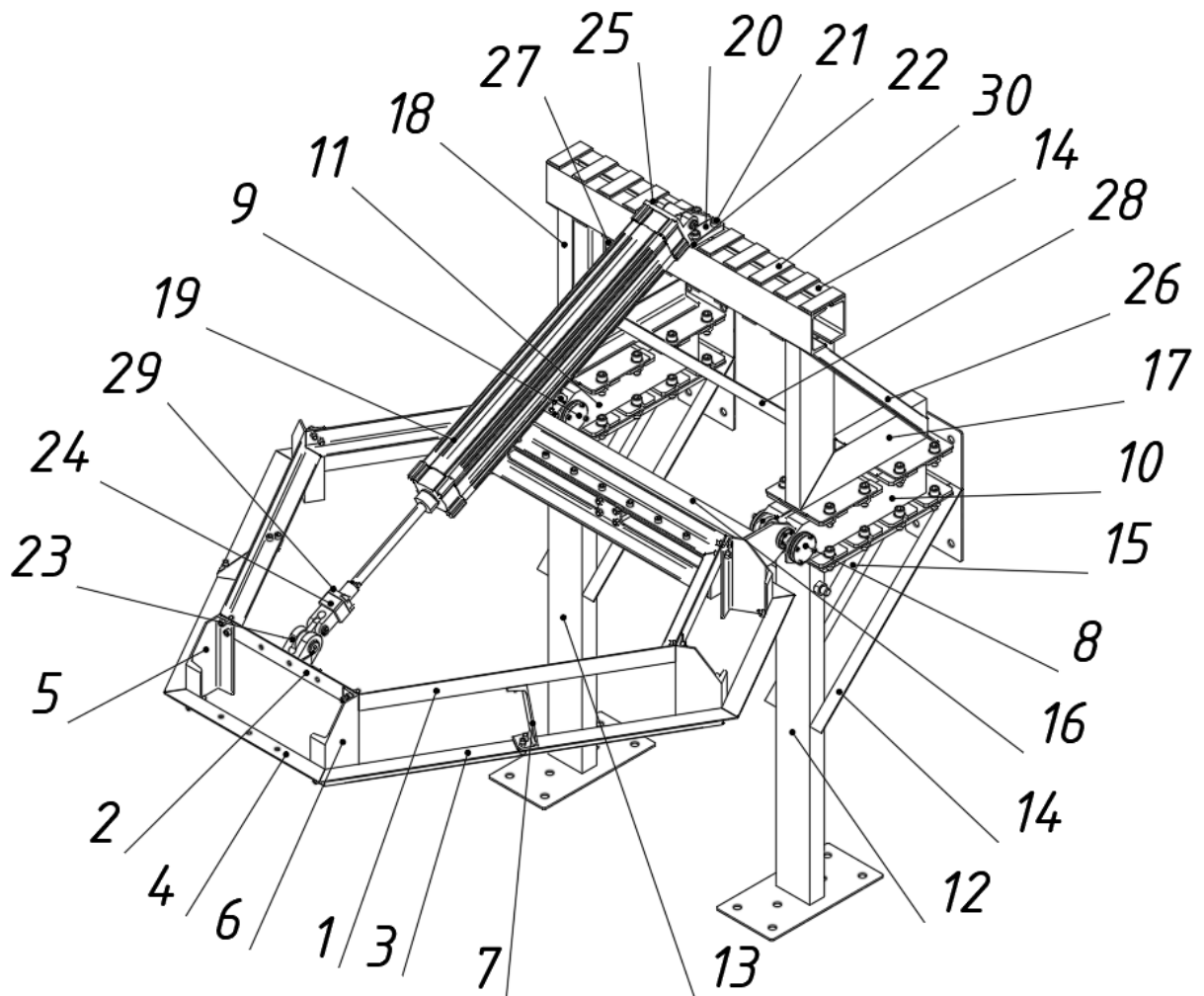


Рис. 2.3.1. Будова поворотного каркаса робот-механічного комплексу.

Каркас утворений двома поясами, які являють собою шестикутник сортименту (кут $x50x50$). Верхній пояс має три довгі ділянки 1 і три короткі 2, також, з кутника $x50x50$. Нижня зона сформована аналогічно верхній з кутника $x50x50$. Верхня і нижня частини з'єднані стійками (швелер [12U-160) 5, 6 і 7. Номери 5 і 6, що являють собою стійки, мають однакову конструкцію. Верхній і нижній пояс закріплено на опорах 8 і 9 для забезпечення регулювання кута рухомої рами відносно кріплення заготовки.

Траверси 10 і 11, в які, кріплять шарнірні опори, кріпляться на експериментальному стенді, який є двома опорами зі швелера, сортаменту [12U, 12 і 13. Щоб збільшити жорсткість установки, до стійок 12 були прикріплені кутники 14 і 15. Конструкція такого самого типу використана в стійці під номером 13. Ці стійки використовуються тільки в якості експериментального стенду, і не будуть використовуватись в подальшому. Каркас, що складається зі стійок 5 , 6 і 7 та верхнього і нижнього поясів, з'єднаний поворотною рамою 16 з опорами 8 і 9.

На опорних стійках 17 і 18 зафіксовано балку 14 для того, щоб підвищити стійкість конструкції, яка піддається вібрації і зміщенню від приводу 19 (пневмоциліндра). Власне, балка складається зі сортаменту швелерів [12U-160 і сімнадцяти пластин, які мають розмір 120x10x45 мм, які позначено 30 номером, закріплених на швелерах за допомогою зварювання. Пластини виконані зі фаскою, поверхневим фрезеруванням, розміром 5 мм, так щоб область зварювання мала більші розміри, що надасть більшу міцність балці. Кронштейн під номером 20 кріпиться до балки болтами М16 (21). Для вирівнювання зусилля на зріз болтів до балки кріпиться пластина призматичної форми 16x10x100 мм 22 з використанням процесу зварювання, в якому прикручуються два болти М8.

Отвори виконані так, що болти вільно проходять через отвори в пластині і закріплюють кронштейн 20. Пластина розміщується на торцевій площині кронштейна і в напрямку, в якому горизонтальні інерційні сили діють на привод при русі штока 19. На верхній частині рами був закріплений кронштейн 23. Кронштейн кріпиться до верхнього поясу рами пластини 2, використовуючи два кута L35x35, які кріпляться зварюванням, до кронштейна 23 і частини верхнього поясу 2. Між кронштейнами 20 і 23 встановлено привід (циліндр) 19 ISO15552. Циліндр 19 з кронштейном 23 з'єднано за допомогою шарніра 24, який запобігає накладанню в'язів на кінематичну пару, що дозволяє змінити кут між цими елементами.

Кронштейн 20 з'єднаний з пневмоелементом 19 за допомогою кріпильних елементів, а саме, болтів М10, показаних номером 25.

Привід переміщує раму на 25 градусів у верхньому положенні (рис. 2.3.2) і на 20 градусів в нижнє положення (рис.2.3.3). Циліндр переміщує каркас робото-механічного комплексу, а саме, дозволяє йому змінювати кут нахилу.

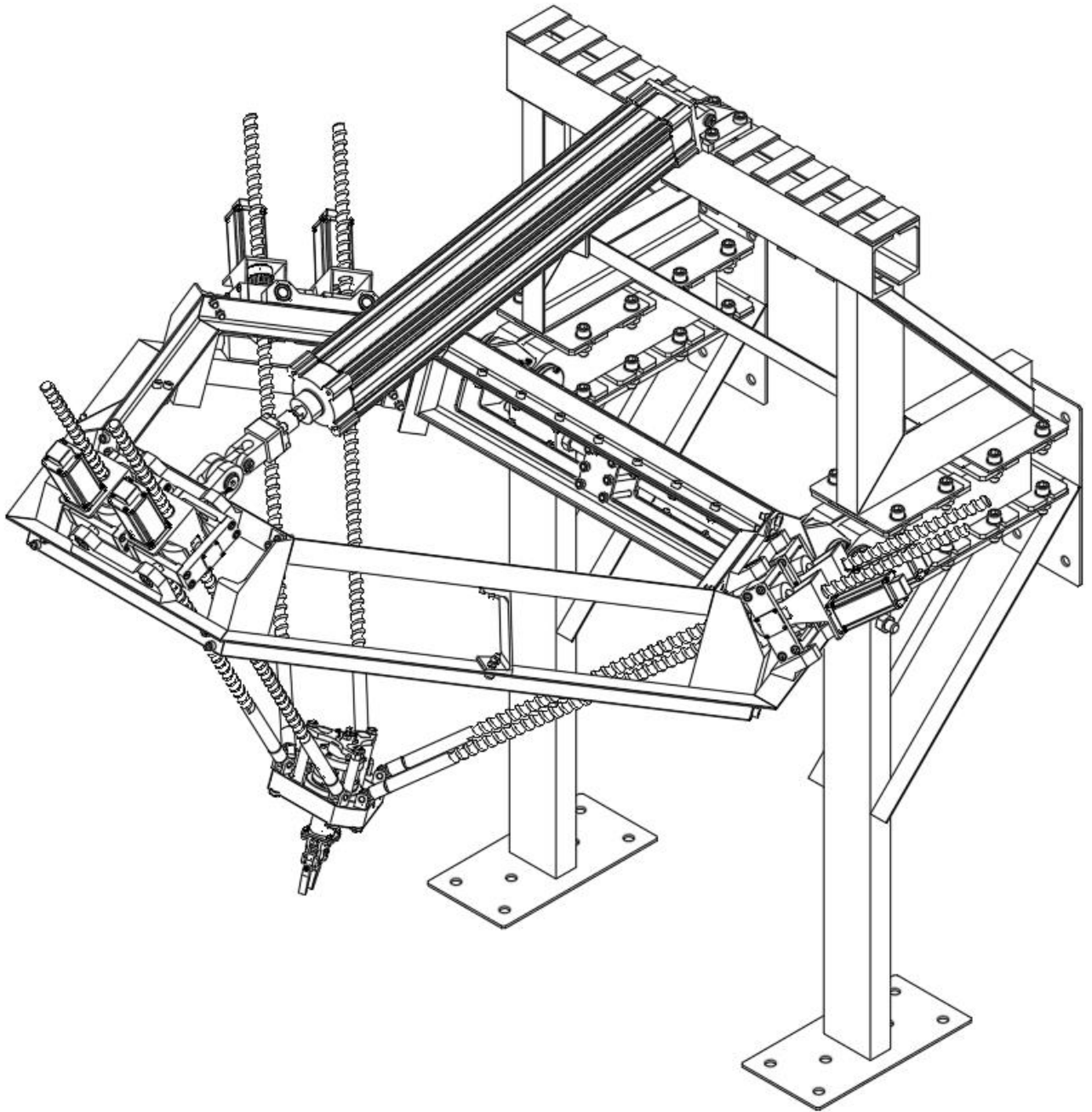


Рис.2.3.2. Верхнє положення рами.

Для того, щоб дана конструкція була надійною було приварено кутники 40×40 26 і 27 і ще один між, власне, стійками 28. Для повороту рами було обрано привід формою призматичного пневмoeлемента від PowerParts згідно ISO15552 (діаметр штока циліндра 100 мм). Це дозволяє збільшити зону в якій працює робот до 45 градусів (рис.2.3.4). Вибраний пневматичний циліндр згідно з варіантом стандарту ISO 15552 відповідає номеру замовлення H F S 100 0700 A4 KK. З серії ходу циліндрів ми вибрали хід 700 мм. Циліндр легкий, немагнітна серія, має на собі армований квадратний профіль з пазами, так що, при необхідності, можна буде на ньому закріпити датчики. Кронштейн з нержавіючої сталі, виконаний згідно стандарту AISI 304. Різьба на кінці пневмoeлемента стандартна, M20x1.5. Це стандартний крок для різьби, що спрощує виготовлення адаптера до нього. Адаптер закріплений стопорною гайкою.

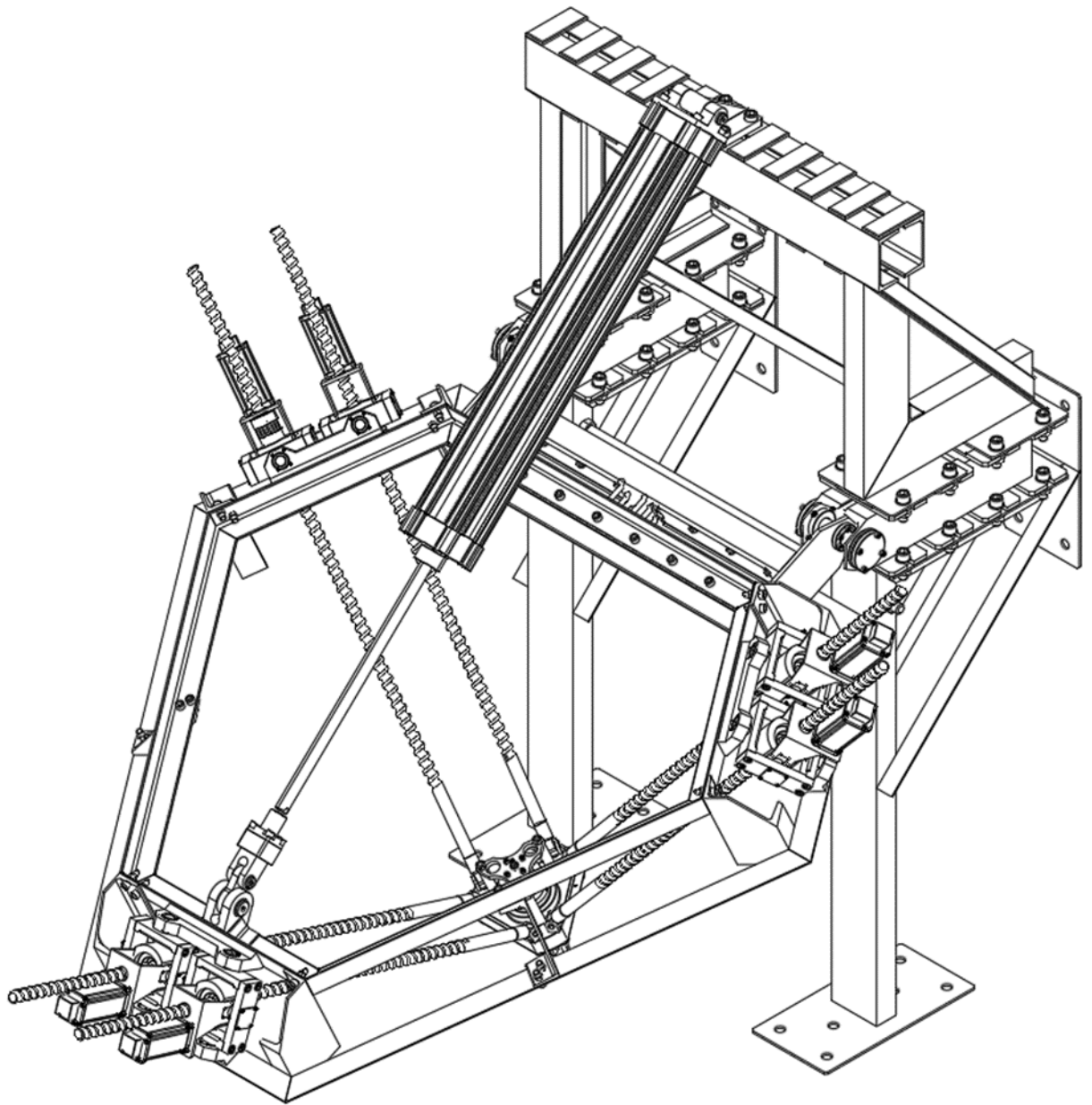


Рис.2.3.3. Нижнє положення рамки.

Шарнір 24 являє собою вузол, що складається з вилки і адаптера, які з'єднані між собою болтами М8, які позначені номером 29. Циліндр простий у використанні, а його компоненти стандартні, це дає нам можливість швидко його відновити або замінити у випадку несправності.

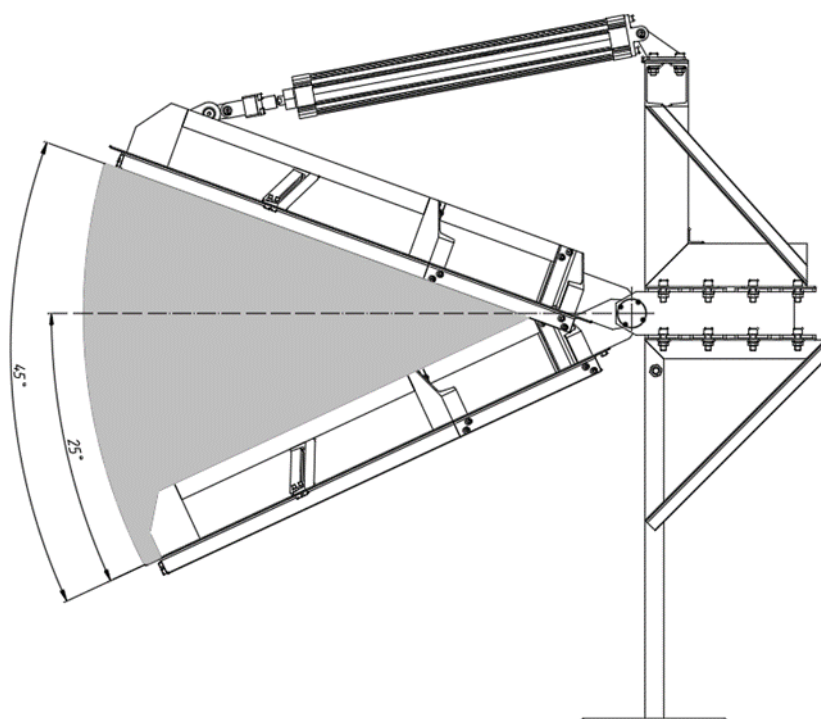


Рис.2.3.4. Діапазон переміщення рами.

Висновки: Для мобільного робототехнічного комплексу забезпечується рух рами на 20 градусів і 25 градусів вгору і вниз відповідно, за допомогою пневмоциліндра, вибраного відповідно до стандарту ISO 15552, основними параметрами якого є діаметр штока 100мм, робочий хід 700мм.

РОЗДІЛ 3

ПІДБІР ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ОБ'ЄКТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПІДБРАНИХ РІШЕНЬ

3.1 Проведення підбору матеріалу матриці та армуючих волокон композитного матеріалу об'єкта вдосконалення

3.1.1 Використання скловолокна як армуючої складової композиційного матеріалу

Композиційні матеріали використовуються не лише в авіаційній сфері машинобудування. Сьогодні можна помітити як композиційні матеріали, завдяки своїм властивостям, набули широких оборотів їх використання і в воєнній промисловості. Наприклад, використання кевлара в бронежелезах. Складений в декілька слоїв кевлар, як виявилось на випробуваннях, зупиняє кулю, що летить набагато краще ніж броня. І до того ж, вага бронежилета зменшилася в 4-5 раз.

Склопластики є одними з найчастіше вживаних композиційних матеріалів. Це обумовлено набором механічних характеристик матеріалу, при цьому вартість матеріалу не є завищеною. Основою у використанні для волокон стає сполука SiO_2 . Діоксид кремнію має дуже високу температуру плавлення, тому доводиться вводити різноманітні добавки. Ці добавки змінюють характеристику матеріалу кінцевого продукту та знижують температуру плавлення. Важливо пам'ятати про аморфні властивості скла (табл.1.1).

Таблиця 1.1

	№ 1, %	№ 2, %	№ 3, %	№ 4, %	№ 5, %	№ 6, %
SiO_2	52 - 56	59	54 - 62	64 - 66	60 - 65	99.999
Al_2O_3	12 - 16	12.1 - 13.2	9 - 15	24 - 26	17 - 24	—
B_2O_3	5 - 10	—	—	—	—	—

CaO	16 - 25	22 - 23	17 - 25	—	5 - 11	—
Mgo	0 - 5	3.1 - 3.4	0 - 5	8 - 12	6 - 12	—
ZnO	—	—	2.9	—	—	—
Na ₂ O	0 - 1	0.6- 0.9	1	0 - 0.1	0 - 2	—
K ₂ O	рекомендовано	0 – 0.2	0.2	—	0 - 2	—
TiO ₂	0.2 – 0.5	0.5 – 1.5	2.5	—	—	—
Zr ₂ O ₃	—	—	—	0 - 1	—	—
Li ₂ O	—	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	0.2 -0.4	0.2	0.1	0 – 0.1	—	—
F ₂	0.2 -0.7	0 – 0.1	рекомендовано	—	—	—

Хімічний склад різнотипових словолокон. Скляні волокна використовуються у двох видах: ниткоподібні та нарізки.

Скляні волокна мають ряд переваг над іншими волокнами:

- Скляні волокна не горять;
- Хороша електроізоляційна властивість матеріалу;
- Здатність до експлуатації під впливом високих температур;
- Здатність до експлуатації під впливом підвищеної вологості навколишнього середовища;
- Висока стійкість біохімічного впливу (хімічний вплив, вплив грибка та бактерій);
- Висока теплопровідність;
- Низький коефіцієнт лінійного температурного розширення.

На початковій стадії технологічного процесу виготовлення скловолокна, необхідно підібрати кварцовий пісок, який буде найчистіший, сухий та без домішок. Наступним етапом стає підготовка суміші, яка складається із вугілля, глини, флюорита, вапняку, борної кислоти та інших домішок. Температура плавлення суміші складає не менше 1260 °С. Скловолоконно виготовляють двома способами.

Перший спосіб це виготовлення скловолокна при одностадійному процесі (рис. 3.1.1.1). Відбувається розплав суміші, що поступає безпосередньо до спеціального обладнання. Таким чином ми маємо можливість виготовити скляну нитку з якої в подальшому можна виготовити пряжу, ровинг та нарізку (дрібно порізане волокно).

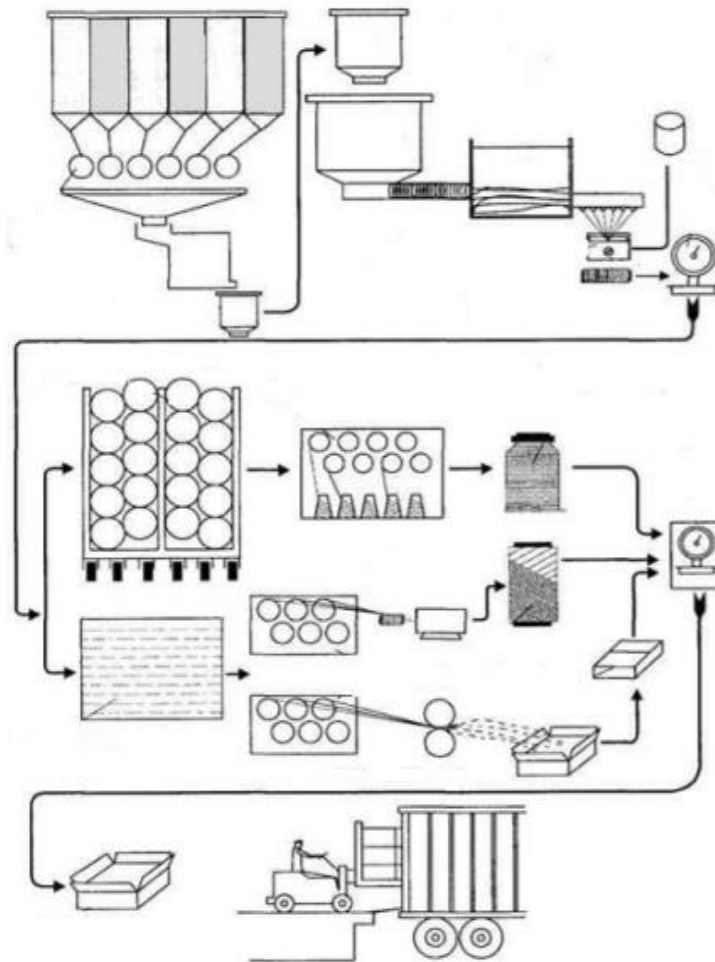


Рис. 3.1.1.1. Одностадійна схема виготовлення скловолокна

Другий спосіб виготовлення скловолокна відбувається при двостаійному процесі. Спочатку суміш, яка складається із вугілля, глини, флюорита, вапняку, борної кислоти та інших домішок розплавляють і виготовляють із них гранулят (рис 3.1.1.2).

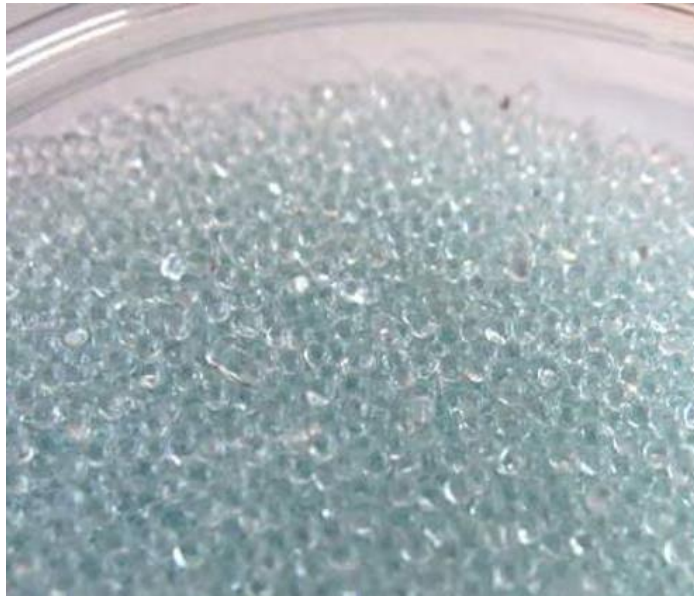


Рис. 3.1.1.2. Скляний гранулят виготовлений при вторинній переробці

Гранулят виглядає як сферичні скляні кульки невеликого розміру. Наступним етапом є розплав грануляту та подальша переробка скловолокна в кінцевий продукт (рис. 3.1.1.3).

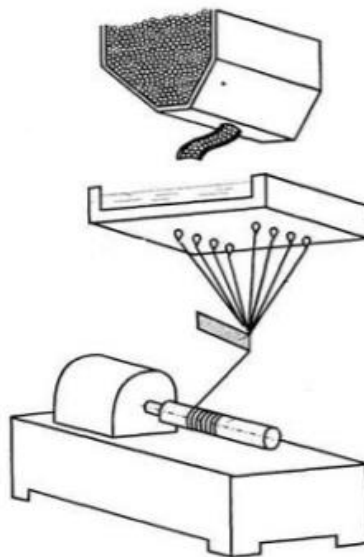


Рис. 3.1.1.3 Двостадійна схема виготовлення скловолокна із етапом грануляції

Досить популярним на виробництвах по виготовленню скловолокна є нанесення на поверхню скловолокна спеціального покриття. Така нитка матиме підвищені механічні властивості та компактність. Зібрані воєдино нитки скловолокна називають стренгами, або джутом. Скловолокно також

покривають спеціальними маслами. Існує два типи мастил для покриття: для зручного транспортування і подальшій переробці, та для запобігання стирання волокон.

Технологічні мастила використовують лише на стадії переробки волокна. До них відносяться матеріали на основі крохмалю чи парафінова емульсія. Позбуваються технологічної змащувальної рідини методом нагріву волокон (1400 °C) або ж змивають за допомогою спеціального розчину. Після позбавлення волокна технологічної змащувальної рідини, на поверхню волокна наносять так звані аппрети. Аппретами називають спеціальний матеріал, який допомагає створити міцний зв'язок між полімерною матрицею, та армуючими волокнами. Їх використовують для поліпшення адгезивних властивостей волокон композиційних матеріалів.

Активні мастила використовують для вбереження волокна від механічного впливу, пошкодження поверхні та підвищенні адгезійних властивостей між полімерною матрицею та армуючими волокнами.

Найпоширенішими є типи скла марок: А, S, Е, С. Найбільш поширеними видами скла є високолужні: темно-зелені та натрієві. Високий вміст лугу в склі характеризує його електропровідність.

У конструюванні не часто використовують моноволокна у своєму початковому вигляді. Такі волокна часто використовують при зміцненні композиційних матеріалів. Але зазвичай скловолокно використовують у вигляді пряжі.

Пряжа композиційних матеріалів — з'єднані між собою нитки волокон за допомогою різних методів переплету та обертання. Пряжа може бути однорідною, або змішаною. Однорідна пряжа це пряжа, яка отримана з переплету однакових волокон, змішана — це пряжа, яка отримана з переплету різного набору волокон. Для оцінки лінійної щільності волокон використовується одиницю виміру під назвою текс.

Текс — відношення маси волокна до його довжини, розмірність (мг/м). Пряжа часто використовується для процесу армування

композиційних матеріалів. Вона використовується у вигляді тканини, або нитки. Тканини, отримані при переплеті волокон чи ниток, є результатом закономірного переплетення поздовжньо та поперечно розташованих елементів. Конструктивно переплети розрізняють за наступними схемами: полотняним, ситцевим, сатиновим, саржевим і трикотажним (рис. 3.1.1.4). Тобто основними технічними характеристиками композиційних тканин є склад волокна, спосіб обробки, вид переплетіння, ширина, маса квадратного метра, товщина та щільність тканини, подовження при розриві, розрив навантаження.

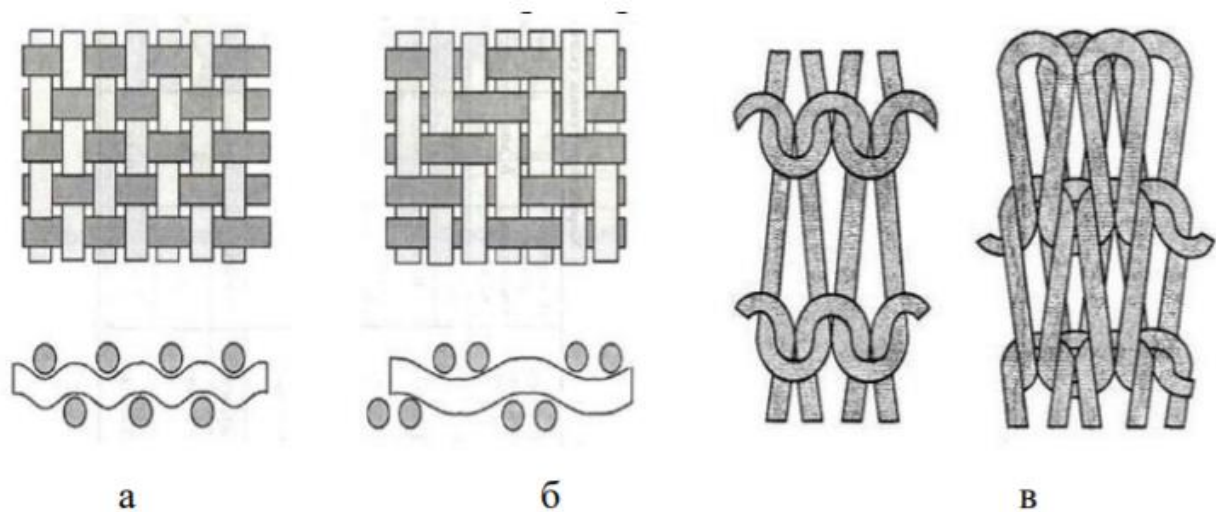


Рис. 3.1.1.4 Схеми переплету волокон в пряжі: а) полотняне, б) саржеве, в) трикотажне.

Недоліком композиційних тканин, стала необхідність використання високоякісних волокон і пряжі, які є досить пластичними.

3.1.2 Фізико-хімічні властивості розчинників та методики їх створення

Окрім основного компоненту матриці, в неї залежно від різних факторів вводять різну кількість затверджувачів, пігментів, каталізаторів та пластифікаторів. Крім того, ще вводять розчинники або розбавлювачі, щоб надати матриці необхідну технологічну в'язкість.

Розчинники - рідини, що розчиняють смолу матриці. Зазвичай випадків матриці з розчинниками застосовують для «сухого» формування.

Робота з розчинниками є високонебезпечною, адже вони є токсичними і легкозаймистими. Розчинниками часто виступають наступні елементи: ацетон, дихлоретан, бензен, толуен, чотирихлористий вуглець, метанол і т.п.).

Розбавлювачі - рідини, які допомагають отримати необхідну технологічну в'язкість матриці. Такі розбавлювачі залишаються в ній після затвердіння. Вони одночасно слугують як пластифікатори, підвищуючи пластичність затверділих матриць. Наприклад, для того, щоб з високов'язких епоксидних смол отримати низьков'язкі епоксидні смоли використовують розбавлювачі. Матриці з розбавлювачами зазвичай використовують при методі «мокрому» формуванні.

Компаунд — це суміш всіх компонентів композиційного матеріалу, що входять до складу матриці. Важливою технологічною характеристикою матриці є її здатність зберігати певний період часу технологічну в'язкість в заданих межах. З часом з матриці розчинники випаровуються, що збільшує в'язкість компаунда. Це призводить до погіршення його властивостей просочувальних характеристик і, що призводить до зміни співвідношення кількості матеріалу матриці і наповнювача в остаточному продукті.

Розчинники здатні повільно випаровуються, а компаунд навпаки здатні довго знаходитися в сталому стані. Іноді цей негативний фактор проявляється і час видалення розчинника починає перевищувати час затвердіння матриці. У таких випадках в затверділому полімері утворюється велика кількість пор і газових бульбашок. Використання таких речовин різко зменшує життєздатність матриці, що є небажаним. Тому краще використовувати розчинники середньої летючості. У процесі транспортування матриця може бути дуже в'язкою, навіть твердою, також іноді до неї потрапляє волога. Тому перед використанням матрицю розігрівають у спеціальних металевих ємностях до 140°C. Після видалення води для доведення до потрібної в'язкості додаємо розчинниками або розбавлювачами.

Просочування - операція заповнення матриці шляхом нанесення компаунда на поверхню армучих волокон і заповнення ним об'єму між волокнами. Композиційні вироби виготовляють двома способами просочування - «мокрим» і «сухим».

При методі мокрого просочування волокна рідкою матрицею, безпосередньо перед намотуванням, відбувається просочування технологічно поєднане з формуванням виробу.

3.1.3 Використання напівфабрикатів препрег для виготовлення композиційних матеріалів

Препреги – представляють собою напівфабрикати композитційного матеріалу, що складаються із армуючих волокон та сполучника (матриці). Найчастіше використовуються армуючі волокна у вигляді скловолокна або вуглецеві волокна. Матриця може мати епоксидну основу, або ж може бути виготовлена на основі термопластиків - ПЕТ або поліетилену. Залежно від властивостей сполучної речовини (матриці) препрег може бути більш м'яким і липкішим, наприклад епоксидна основа, або ж більш твердим та сколизьким (ПЕТ).

Існує декілька методів виготовлення препрегів. Найпоширенішим вважається пропитка армуючих волокон розплавом матриці, так названий метод розплаву. Більша частина виробів із композиційного матеріалу сьогодні виготовляється саме по такому методу. Ще один метод - просочення розчином матриці армуючих волокон з подальшою сушкою. Незважаючи на застарілу і низькоекологічну технологію, таким чином виготовляється значна частина препрегів. Існують і інші технології виготовлення препрегів.

Процес виготовлення деталі з препрега починається із створення заготовок певної геометрії заданої конфігурації за шаблоном з подальшою викладкою заготовок на оснастку. Після викладки необхідної товщини деталей безпосередньо формується в пресі або за методом вакуумізації за допомогою вакуумних мішків формується в автоклаві.

Препреги — це волокна у вигляді ниток, джгутів, стрічок та тканин, які після просочення матрицею та частково підсушені. Матриці з розчинниками мають низьку в'язкість, що забезпечує високу якість і рівномірність просочення. Препреги можуть зберігатися без зміни механічних властивостей від Спобіб сухого намотування є ефективнішим, ніж мокре.

Недоліками методу мокрого намотування:

— Для мокрого намотування смоли можна використовувати лише ті, які в рідкому вигляді мало випаровуються, наприклад, епоксидними або поліефірними;

— Щоб відрегулювати в'язкість, розчинники застосовувати не рекомендується. Оскільки розчинники, видаляючись при затвердінні намотаного виробу, можуть спричинити утворення пор. Використання даного методу намотки є актуальним для виготовлення невідповідальних деталей;

3) Використання рідких матриць є незручним через рівень забрудненості робочого місця під час роботи;

4) Продуктивність виготовлення елементів методом мокрого намотування обмежена швидкістю питування матрицею ниток;

5) При методі мокрого намотуванні важко відрегулювати концентрацію компонентів матеріалу. Зміна діаметра намотуваної деталі сприяє зміні зусилля натягу і, що призводить до різного вмісту смоли по товщині виробу.

При мокрому методі виготовлення препрегів, негативним моментом є переведення матриці, адже досить велика її частина виступає надлишком і пропадає. Сухе намотування позбавлене такої проблеми та відрізняється від мокрого наступними перевагами:

1) оскільки швидкість намотування не обмежена швидкістю просочення а залежить лише від можливостей намотувального

устаткування, такий метод має високу продуктивність виготовлення препрегів;

2) для виготовлення препрегів можна використовувати дуже широкий вибір ряду смол;

3) матриця рівномірно розподіляється по всьому об'єму препрега.

4) Мінімальні відходи використовуємих матеріалів.

5) Можливість виготовлення виробів складних форм.

6) Низька пористість отриманих виробів та підвищена їх герметичність.

До недоліків сухого намотування відносяться: удвічі чи втричі підвищена вартість у порівнянні з мокрим методом виготовлення, необхідність використовувати спеціальне технологічне обладнання. Також при сухому намотуванні потрібні більші зусилля натягу.

Армуючими волокнами для препрегів можуть бути: окремі волокна, нитки, джути та тканини. У волокнистому вигляді використовують бор, металеві сплави, карбід кремнію, скловолокно та інші. Нитками виступають з'єднані між собою волокна. Нитки можуть бути кручені або некручені. Армуючі волокна потовщують наносячи шари матриці на їх поверхню і склеюючи сусідні волокна. При такому методі виготовлення всі волокна в викладені в одному напрямку та утворюють шпон. Наприклад, при виробництві Свами (анізотропний матеріал), в якому армуючими волокнами виступають елементарні скляні волокна, разом із витягуванням волокон з фільтр та їх подальшим намотуванням на обертовий барабан, їх покривають шаром матриці, яка досить швидко висихає при кімнатній температурі. У такому випадку, розчинник повинен бути високолетучим. Також окремі волокна з бору, металевих сплавів, карбиду кремнію пропускають через ємність рідкої матриці, таким способом просочуючи волокна матрицею. Важливим завданням є забезпечення певного співвідношення між кількістю армуючих волокон та матриці, для цього варто постійно контролювати товщину препрега.

Існують наступні методи просочення армуючих волокон матрицею:

- протягування армуючих волокон через рідку матрицю;
- роликом, що купається;
- примусове просочення;
- напилення.

При використанні жорстких армуючих волокон таких як високомодульні, борні, графітові, та ін. волокна, не допускаються малі радіуси перегину, тому вирішенням проблеми нанесення матриці стало використання методу просочення роликом, що купається.

Для отримання вуглецевої матриці використовують кам'яновугільні і нафтові пеки завдяки високому вмісту вуглецю (близько 92-95%) та високого коксового числа. Рядом переваг використання пеків стали: доступність і низька вартість, гарна графітуєміть коксу, виключення розчинника з технологічного процесу та висока щільність. Недоліками стали висока пористість, деформація виробів, та сміст канцерогенних сполук в їх складі, що вимагає додаткових заходів безпеки.

У карбонізованій пластиці виникає значна пористість, що виникає внаслідок виділення летких з'єднань при термодеструкції смоли. Така пористість значно знижує фізико-механічні властивості таких композиційних матеріалів. Тому після проведення стадії карбонізації вуглепластика ми отримуємо лише пористі матеріали, які не характеризуються високою міцністю, наприклад, ВВКМ, що використовують для теплоізоляційного призначення. Для усунення пористості та підвищенні щільності карбонізованого матеріал його знову просочують матрицею і карбонізують. Такий цикл проводять неодноразово. Повторні просочування проводиться в режимі «вакуум-тиск», в автоклавах. Режим «вакуум-стиск» відіграє в процесі важливу роль, адже після нагрівання заготовки в вакуумі, подається рідка матриця і створюється надлишковий тиск до 0,6-1,0 МПа. При цьому використовуються розчини і розплави різних сполук. Під час проходження одного такого циклу пористість композиту зменшується. Саме тому з проведенням кожного

наступного циклу необхідно зменшувати в'язкість матриці. Ступінь ущільнення при повторному циклі просочення залежить від типу матриці, коксового числа та пористості виробу. З збільшенням щільності при повторному просоченні підвищується механічні характеристики матеріалу, відповідно міцність матеріалу росте.

Так виготовляють композиційні матеріали з щільністю до 1800 кг / м³ та вище. Метод карбонізації вуглепластика не є складним, але є досить часозатратним, що призводить до високої собівартості готового виробу. Адже доводиться циклічно виконувати проведення операцій ущільнення.

При отриманні композиційних матеріалів високої міцності також використовують спосіб осадження піровуглеця з газової фази газоподібного вуглеводню, таких як: метан, бензол, ацетилен і т. д.. Також використовують суміш вуглеводню і газу (інертний газ або водень), що дифундує через вуглеволокнутий пористий каркас. Піровуглець, що поступово осідає, створює сполучні містки між волокнами. Структура одержуваного піровуглеця залежать від різних факторів: температури, тиску, швидкості потоку газу, реакційного обсягу і ін. Властивості одержуваних композиційних матеріалів визначаються типом волокна та схемою армування.

3.1.4 Галузі застосування композиційних матеріалів

Робота із композиційними матеріалами завдяки ряду їх позитивних механічних характеристик в сучасному світі є досить популярною. Майже кожна галузь людської діяльності використовує такий матеріал, адже показники міцності і жорсткості вищі ніж наприклад в сталі, а вага майже в 4 рази менша.

Найбільш широко композиційні матеріали використовуються в наступних областях застосування:

— Виготовлення складноконтурних корпусів та інших елементів для болідів Формула-1;

- Радіоелектроніка. Композиційні матеріали використовуються як сполучний компонент ламінованих шарів і жорстких плат, наприклад препреги друкованих плат;
- Вітроенергетика. Виготовлення контуру лопаток для вітрогенераторів є досить складним процесом через їх складний профіль.
- Літакобудування. Одна з найбільш використовуваних галузей по використанню композиційних матеріалів. Напівфабрикати у вигляді препрегів тут застосовуються для виробництва маси деталей: елементів корпусу апаратів, фюзеляжу, крил, оперення, лопастей, гвинтів, і т.п. За рахунок використання композиційних матеріалів загальна вага авіаційного транспорту знижується, при відсутності зростання в ціні. Це пов'язано із тим, що літаки завжди були дорогими у виготовленні та експлуатації, адже у своїй конструкції мали деталі з титану, який є досить високовартісним на ринку матеріалів.

Останнім часом композиційні матеріали широко використовуються і медичних цілях. Наприклад для виготовлення протезів. Протези із композиційних матеріалів мають високу міцність і невелику вагу. Такий протез буде надійним та зручним у використанні. Також композиційні матеріали використовуються і судно-, та автомобілебудівництві,

Композиційні матеріали використовуються і в сфері будівництва та проведенні ремонтних робіт по зміцненню бетонних споруд, що заощаджує великі суми коштів для фірм, які таким чином зміцнюючи приміщення не витрачаються на проведення капітального ремонту.

3.2 Вибір матеріалу для нової об'єкта вдосконалення

Підбір матеріалу проводився методом відсіювання. Головними критеріями стали: висока міцність, висока жорсткість, мінімальна вага, протидія гігроскопічності та економічна складова. Матеріалом для нової версії рами став композиційний матеріал.

Використання композиційного матеріалу під час конструювання нової версії рами обумовлено позитивними характеристиками та набором

властивостей композиційного матеріалу. А саме композиційний матеріал має високу міцність, жорсткість при мінімальній вазі. Задача конструювання з композиційного матеріалу для інженерів є досить складною. При розрахунках інженер має наперед продумати як матеріал буде себе поводити під час прикладення навантаження, а саме кручення, стиск-розтяг, зсув та згин.

Армовані смоли займають провідне становище серед композиційних матеріалів. Волокна сприймають основне навантаження, відповідно в залежності від властивостей волокон, визначається міцність і жорсткість всього матеріалу. Набір характеристик волокон композиційних матеріалів можна розглянути в таблиці 1. Особливості роботи з композиційними матеріалами потребують створення чіткої схеми виготовлення рами. Першим етапом є підбір складових композиційного матеріалу.

Підберемо матеріал волокон майбутнього виробу виходячи із даних.

Таблиця 2

Властивості	Волокно			
	Скляне	Борне	Вуглецеве	Арамідне
Механічні властивості				
Питома міцність	Дуже висока	Висока	Середня	Висока
Питомий модуль	Низький	Високий	Середній	Високий
Опір удару	Задовільний	Високий	Поганий	Високий
Подовження при розриві	Високе	Низьке	Середнє	Середнє
Теплофізичні				
Стабільність	Відмінна	Відмінна	Середня	Відмінна
Теплопровідність	Низька	Середня	Висока	Низька
Коефіцієнт лінійного температурного розширення	Дуже низький	Дуже низький	Середній	Середній
Демпфуюча здатність	Задовільна	Висока	Добра	Відмінна
Виробничо-технологічні				
Найменший радіус вигину	Дуже великий	Малий	Малий	Малий
Чутливість до пошкоджень при переробці	Середня	Середня	Висока	Низька

Можливість переробки в стрічки, тканини	Добра	Погана	Добра	Добра
Вартість	Низька	Висока	Помірна	Помірна

Скловолокно має високі механічні, теплофізичні та виробничо-технологічні властивості. А саме дуже високу питому міцність, задовільний рівень протидії ударів, високе подовження при розриві, відмінну теплофізичну стабільність, низьку теплопровідність, дуже низький коефіцієнт лінійного температурного розширення задовільну демпфуючу здатність, середню чутливість до пошкоджень при ремонтних роботах, дуже високі радіуси вигину волокна, гарну здатність до переплету в тканини та стрічки при низькій собівартості.

Виходячи із даних, що представлені у таблиці 2, ми бачимо, що скляні волокна є оптимальним варіантом для вирішення нашої задачі, а саме виготовлення нової рами.

Наступним етапом є підбір напрямку волокон та кількості слоїв в композиційному матеріалі.

Найпродуктивнішою структурою напрямку волокон є $[0/90/\pm 45]$. Наш проект не є виключенням, дана схема також є актуальною у нашому випадку, але не забуваємо про забезпечення збереження геометричної форми. Для цього вирішено використати дві структури волокон $[0/90/\pm 45]$ у дзеркальному вигляді. Нова структура волокон має вигляд $[0/90/\pm 45/\pm 45/90/0]$. Дана структура збереже геометричну конфігурацію поверхні рами після термічної обробки в автоклаві. Дзеркальне розміщення структур забезпечить відсутність скорчування композиційного матеріалу.

Беручи до уваги трудо-, енерго-, часозатратність виготовлення композиційного матеріалу з етапу наявності лише вхідних матеріалів елементів композиційного матеріалу було вирішено використати напівфабрикат препрег із набору тканевих шарів із різним напрямком волокон.

Підбір тканин відбувається також як і відбір волокон за принципом відсіювання по заданим характеристикам (табл. 3) У даному випадку при відборі ми керуємося наступними даними:

- E_1, E_2, G_{12} — модуль пружності вздовж волокна , модуль пружності поперек волокна , модуль пружності на зсув в площині слоя;
- μ_{12}, μ_{21} — коефіцієнти Пуассона;
- $\tau_{МС}$ — міцність при міжслойному зсуві;
- $F_{1p}, F_{1c}, F_{2p}, F_{2c}, F_{12}$ — границі міцності вздовж волокна, поперек волокна на стиск-розтяг та на стиск при сзуві;
- α_1, α_2 — коефіцієнти лінійного температурного розширення;
- $c_p, \lambda_1, \lambda_2$ — теплоємність та теплопровідність вздовж і поперек волокон;
- δ_0 — товщина монослоя композиційного матеріалу.

Таблиця 3

Композиты														
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Тип КМ	Углепластики							Стеклопластики				Органопластики		
Наполнитель	волокно AS4, 63 %	волокно IM6, 65 %	волокно Mod I, 45 %	волокно GY-70, 57 %	волокно AS4, 58 %	AGP370-5H, 62 %	ткань CF0604, 55 %	волокно E-стекло, 55 %	волокно E-стекло, 55 %	волокно S-стекло, 50 %	ткань Style 7781, 45 %	ткань M10E, 50 %	волокно Kevlar 49, 60 %	ткань K120, 45 %
Связующее	эроху 3501-6	эроху SC1081	polyimide WRD9371	эроху 934	PEEK APC2	эроху 3501-6	эроху	эроху	эроху	эроху	эроху 5245C	эроху 3783	эроху	эроху M10.2
ρ , кг/м ³	1580	1600	1540	1590	1570	1600	1560	1970	2100	2000	2200	1900	1380	1380
E ₁ , ГПа	147	177	216	294	131	77	62,6	41	39	43	29,7	24,5	80	29
E ₂ , ГПа	10,3	10,8	5	6,4	8,7	75	60,3	10,4	8,6	8,9	29,7	23,8	5,5	29
G ₁₂ , ГПа	7,0	7,6	4,5	4,9	5,0	6,5	3,98	4,3	3,8	4,5	5,3	4,7	2,2	1,8
μ_{12}	0,27	0,27	0,25	0,23	0,28	0,06	0,04	0,28	0,28	0,27	0,17	0,11	0,34	0,05
F _{1p} , МПа	2280	2860	807	589	2060	963	927	1140	1080	1280	367	433	1400	369
F _{1c} , МПа	1725	1875	655	491	1080	900	729	620	620	690	549	377	335	129
F _{2p} , МПа	57	49	15	29,4	78	856	874	39	39	49	367	386	30	369
F _{2c} , МПа	228	246	71	98,1	196	900	620	128	128	158	549	335	158	129
F ₁₂ , МПа	76	83	22	49,1	157	71	133	89	89	69	97,1	84	49	113
G _{MC} , ГПа	3,7	3,8	3,6	3,8	3,7	4,1	3,8	3,5	3,8	3,6	3,7	3,6	1,8	2,5
τ_{MC} , МПа	124	68	82	90	78	65	75,4	47	44	45	41	44	37	33
α_1 , 10 ⁻⁶ /K	-0,9	-0,3	0	-0,1	-0,2	3,4	3,3	7	7	5	10	12	-2,0	-2,6
α_2 , 10 ⁻⁶ /K	27	30	25,3	26	24	3,7	3,8	26	21	26	10	13	60	-2,6
δ_0 , мм	0,12	0,15	0,16	0,1	0,15	0,42	0,3	0,08	0,15	0,15	0,25	0,23	0,15	0,22
Металлические сплавы														
Номер	Материал					ρ , кг/м ³	E, ГПа	G, ГПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	α , 10 ⁻⁶ /K			
15	Д16АТ (1163)					2800	71	27	460	350	22,9			
16	1420					2470	75	27	450	270	22,2			
17	В95пчТ (закалка и старение)					2850	72	27	570	500	23,2			
18	ВТ22 (закалка и старение)					4500	112	39,2	1400	530	8,0			
19	30ХГСА (закалка и отпуск)					7850	215	84	1700	1500	11,0			

Із тканинних склопластиків, представлені дві марки Style 7781 та M10E. Оскільки механічні та теплофізичні властивості за значеннями

знаходяться майже на одному рівні, то головним фактором вибору стає низька собівартість. Тому обираємо тканину Style 7781 (Рис.).

Препрег буде представляти собою набір тканинних полотен Style 7781 зі скловолоконними армуючими елементами та матрицею (заповнювач) ероху 5245С. Структура слоїв волокон препрега вміщатиме наступні напрямки волокон $[0/90/\pm 45/0/90/\pm 45/\pm 45/90/0/\pm 45/90/0]$ (16 слоїв). Перепліт волокон в ткані виконаний сатиновим способом (рис. 3.2.1, рис. 3.2.2).

Style 7781 E-Glass



Product Properties	
Style	7781
Finish	Compatible with Polyester, Vinyl Ester, & Epoxy
Weave Pattern	8H Satin
Yarn Description	Warp: ECG 75 2/2 - Fill: ECG 75 2/2
Count: Ends x Picks (in)	55-60 x 52-56
Weight	9.0-10.2 oz/yd ²
Breaking Strength (lb/in)	Warp: >150 lb/in - Fill: >150 lb/in
Thickness	0.008-0.012 in
Roll Length	125 Yards

Рис. 3.2.1. Фізико-хімічні властивості препрега Style 7781

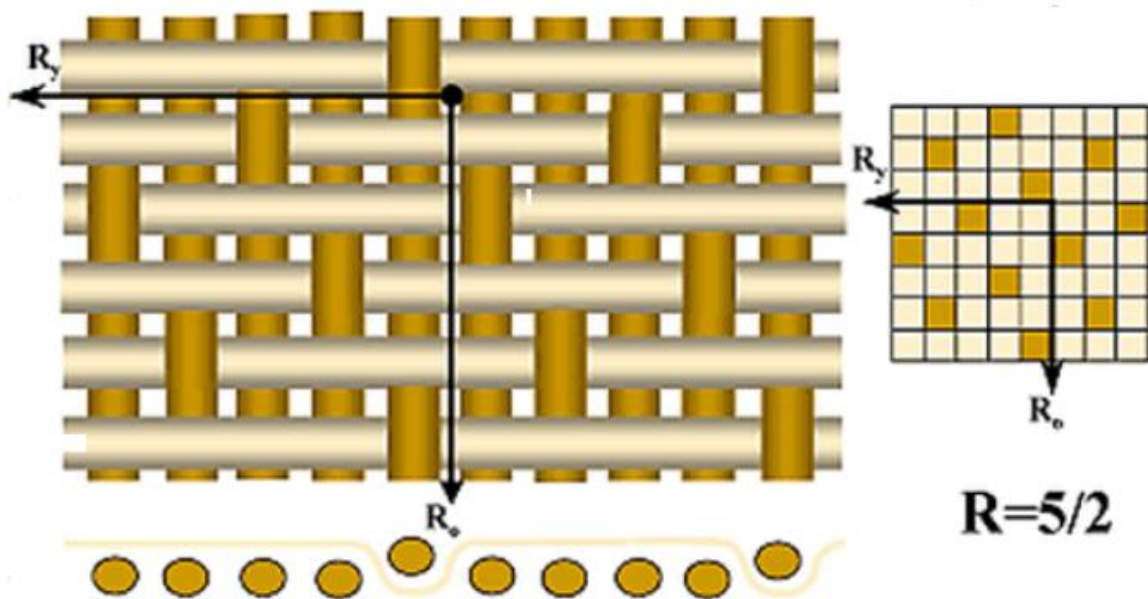


Рис. 3.2.2. Схема способу переплету армуючих волокон препрега «Сатин»

3.3 Проведення підбору структури напрямку волокон композиційного матеріалу об'єкта вдосконалення

3.3.1 Параметри об'єкту винаходу при проектуванні та конструюванні

Процеси конструювання та проектування відносяться до предметів інженерної роботи. Проектуванням можна назвати задоволення будь-якої потреби людини. На даному етапі людина створює компоновку майбутнього агрегату. Визначається із його майбутніми параметрами, що мають бути забезпеченими. Таким чином створюється проект майбутнього агрегату.

Наступним етапом створення агрегату є процес конструювання. Під час даного процесу відбувається реалізація майбутнього пристрою, що забезпечує вимоги виробництва, а саме: бюджету, зовнішнього вигляду, надійності майбутнього виробу, універсальності й т. д.

Існує ряд вимог, які має забезпечувати майбутній виріб технічного пристрою:

- Дизайн (об'єкт винаходу має бути привабливим на зовнішній вигляд для покупця);
- Ергономіка (об'єкт винаходу має бути зручним в користуванні);
- Експлуатація (об'єкт винаходу має виконувати ряд функцій, які ще на етапі проектування були йому надані);
- Підтримка і ремонт (відновлення наданих функцій об'єкту);
- Безпечна утилізація після закінчення експлуатаційного строку.

Одним із найскладніших інженерних задач є проектування при якому необхідно забезпечити певні просторові задачі. Таким чином, ми маємо вміти проектувати елементи конструкцій та їх з'єднання між собою так, щоб забезпечити певні просторові умови. Даними об'єктами для розрахунків стають наступні елементи: балки, стержні, пластини, оболонки та місця їх з'єднання між собою.

3.3.2 Використання прямої та оберненої задач в розрахунках при проектуванні та конструюванні

Кінцевою ціллю інженера при проектуванні та конструюванні об'єкта винаходу — числа (напруги, розміри, ціна і т. д.). Для проведення розрахунків використовують пряму та обернену задачі. Для вирішення прямих задач принципові схеми вже вибрані, тож залишається лише порахувати шуканий параметр. Для розрахунку прямих задач використовуються математичні апарати та програмні забезпечення (такі як MathCAD, MATLAB і т.д.). Головна задача інженера при вирішенні прямої задачі це отримати результат та вміти їх інтерпретувати при удосконаленні вже існуючої моделі, або ж підбору найбільш вдалої серед запропонованих.

А для обернених задач в інженера є широка можливість для використання своїх знань та вмінь. Обернені задачі називають ще некоректно поставленими задачами. Зазвичай часто порушується одне із трьох умов (існування єдиного рішення, стабільність та існування рішення) коректної поставленої задачі — стабільність.

Не існує чіткого розподілення між прямою та оберненою задачами. Зазвичай інженери користуються обома. Спочатку використовують обернену задачу, а потім для уточнення даних застосовують пряму задачу.

За допомогою обернених задач, ми отримуємо декілька схемних варіантів рішення одного завдання.

Наступним етапом стає конструювання. Необхідно втілити наш робочий об'єкт в матеріалі, використовуючи елементи стержнів, балок, панелей і т. д.. Кожен елемент конструкції може сприймати різні навантаження, тому необхідно для кожного елемента індивідуально підбирати матеріал та структуру матеріалу, для того, щоб прикладене навантаження не призвело до непрацездатного стану (поломки) елемента. Варто відмітити про важливість проведення комплексного аналізу та підбору матеріалів.

Як вже згадувалося раніше наш виріб має забезпечувати ряд вимог: експлуатаційним, споживчі, легке обслуговування та придатність до ремонтних робіт, ергономічні, дизайнерські, утилізаційні та безпека для здоров'я та життя людини. Кожна з перерахованих вимог веде до певних вимог для матеріалу елементів.

Існує велика кількість методик підбору матеріалу для елементів деталей конструкцій. Підбір може відбуватися починаючи з інтуїтивного рівня закінчуючи складними математичними розрахунками та експертними оцінками. Були спроби класифікувати матеріали за рівнем важливості, але це складно зробити через момент суб'єктивного відношення. У світі існує велике різноманіття матеріалів, тому процес підбору є досить трудомістким та часозатратним. У теорії, будь-який елемент конструкції можна виготовити із будь-якого матеріалу. Проблема полягає лише у вартості та обмеженні в масі чи габаритних розмірах.

Процес підбору матеріалу схожий на процес відбору через сито. Часто інженер користується своїм досвідом при відборі, або ж інтуїцією. Підбір композитних матеріалів є досить складним процесом, адже це анізотропний матеріал. Існує декілька принципів підбору матеріалу:

- Фізичні вимоги до матеріалу: теплопровідність, електропровідність, теплоємність, працездатність в заданих температурних рамках та умов експлуатації (радіація, вологість і т.п.);

- Механічні вимоги до матеріалу: найбільший по вимогам клас, до якого відносяться вимоги жорсткості, міцності, довговічності, стабільність властивостей;

- Можливість виготовлення необхідного елемента відповідно певним технологічним процесам та приладам. Для того, щоб ми могли обробити матеріал заготовки, цей матеріал необхідний володіти певним набором властивостей. Наприклад властивість матеріалу до кування, піддаватися зварюванню, можливе лиття, допустимість механічного оброблення і т.п.

Важливу роль в процесі виготовлення відіграє ціна майбутнього виробу. Тому інженер ще на етапі проектування повинен наперед продумати шлях найменшої собівартості майбутнього виробу.;

Наприклад політика компанії «Мерседес» полягає в тому, що по підрахункам ціни матеріалів для будь-якого автомобіля, вона не має перевищувати від 15% прогнозованої вартості майбутнього автомобіля.

- Придатність майбутнього винаходу до ремонту;
- Безпечна вторинна переробка. Основи інженерії та технології сталого розвитку суспільства піднімають на високий рівень важливість проблеми екологічного стану нашої планети.

3.3.3 Підбір характеристик матеріалів для створення композиційного матеріалу

Після проведення першого етапу відбору матеріалів із необхідними для нас властивостями, як правило із величезної маси матеріалів, залишається декілька. Тому наступним етапом стає відбір вже серед тим матеріалів, що у нас залишилися. Їх необхідно оцінити в порівнянні по окремим властивостям.

Першими для подальших розрахунків необхідно порахувати міцність, жорсткість та теплопровідність.

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_B}{\rho}, \quad (3.3.3.1)$$

$$k_E = \frac{E}{\rho}, \quad (3.3.3.2)$$

$$k_{\lambda} = \frac{\lambda}{\rho}, \quad (3.3.3.3)$$

Для спрощення підрахунків, іноді дані характеристики пов'язують із вартістю та якістю матеріалу:

$$\begin{aligned} k_{\sigma}^* &= \frac{k_{\sigma}}{c} = \frac{\sigma_B}{c_{\rho}}, \\ k_E^* &= \frac{k_E}{c} = \frac{E}{c_{\rho}}, \end{aligned} \quad (3.3.3.4)$$

C – вартість матеріалу (1 кг).

Зазвичай на даному етапі не розглядають енергозатрати пов'язані із виготовленням об'єкта винаходу. Але досить часто саме вони складають 50-70 % від майбутньої вартості продукції. Тому необхідно пам'ятати про це і ще на етапі конструювання наперед розраховувати приблизну вартість.

Розглянемо детальніше деякі окремі фізичні характеристики матеріалів. Наприклад виконаємо підбір стержня на розтяг з мінімальною вагою. Основною характеристикою стержня буде міцність на розтяг:

$$\sigma = \frac{N}{f} \leq \sigma_B, \quad (3.3.3.5)$$

N – сила розтягу;

F – площа поперечного перерізу;

σ_B – границя міцності матеріалу.

Знаходимо мінімальну площу поперечного перерізу та визначаємо масу:

$$f_{min} = \frac{N}{\sigma_B}, \quad (3.3.3.6)$$

$$G = lf\rho = \frac{Nl}{\frac{\sigma_B}{\rho}} = \frac{Nl}{k_\sigma}, \quad (3.3.3.7)$$

l – довжина стержня.

Звідси робимо висновок, чим вища міцність, тим менша маса стержня.

Але його критична сила, щоб він не втратив стійкості, має бути більшою за діючу.

$$N_{кр} = \frac{k\pi^2 EI}{l^2} \geq N, \quad (3.3.3.8)$$

K – коефіцієнт на опір на кінці стержнів;

E – модуль пружності;

I – момент інерції

Для поперечного перерізу форми кола:

$$I = \frac{\pi r^4}{4}. \quad (3.3.3.9)$$

Як висновок:

$$N_{кр} = \frac{k\pi^3 E r^4}{4l^2} \geq N. \quad (3.3.3.10)$$

Виведемо мінімальний необхідний радіус поперечного перерізу стержня та введемо в формулу для визначення маси стержня:

$$r = \sqrt[4]{\frac{4Nl^2}{k\pi^3 E}}, \quad (3.3.3.11)$$

$$G = l\rho f = l\rho\pi r^2 = \pi l\rho \sqrt{\frac{4Nl^2}{k\pi^3 E}} = 2l^2 \sqrt{\frac{N}{k\pi}} \frac{1}{\frac{\sqrt{E}}{\rho}}. \quad (3.3.3.12)$$

Робимо висновок, що величина E/ρ є характеристикою матеріалу яку можна використовувати для порівняння різних матеріалів. Чим більша величина E/ρ , тим легшим є стержень.

З фізичної точки зору E/ρ це збільшена вдвічі величина енергії, яка необхідна для стиску-розтягу матеріалу, вагою 1 кг вдвічі. Нехай маємо стержень довжиною l та площею поперечного перерізу f , товщиною стінки δ , та середнім радіусом. Тоді момент інерції становить:

$$I = \pi\delta r^3. \quad (3.3.3.13)$$

Підставимо вираз в умову стійкості:

$$N_{кр} = \frac{k\pi^3 E\delta r^3}{l^2} \geq N, \quad (3.3.3.14)$$

$$N_{кр} = \frac{k\pi^3 E(\delta r)^2}{l^2} \frac{r}{\delta} \geq N, \quad (3.3.3.15)$$

$$(\delta r) = \sqrt{\frac{Nl^2}{k\pi^3 E}} \frac{\delta}{r}. \quad (3.3.3.16)$$

Підставимо в формулу для визначення маси:

$$G = 2\pi r\delta l\rho = 2l^2 \sqrt{\frac{N}{k\pi}} \frac{\delta}{r} \frac{1}{\frac{\sqrt{E}}{\rho}}. \quad (3.3.3.17)$$

Можна побачити, що маса трубчастого стержня також буде залежати від δ/r . Тобто при підборі стержня потрібно брати до уваги не тільки властивості матеріалу, а і його форму.

В ідеальному варіанті підібрати такий матеріал, в якому руйнування матеріалу та стійкості наступить одночасно:

$$2\pi r\delta\sigma_B = \frac{k\pi^3 E\delta r^3}{l^2}, \quad (3.3.3.18)$$

$$2\pi r\delta\sigma_B = N,$$

$$r = \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{2\sigma_B}{kE}}; \delta = \frac{N}{2l\sigma_B} \sqrt{\frac{kE}{2\sigma_B}}. \quad (3.3.3.19)$$

Отже маса стержня в якому руйнування матеріалу та стійкості наступить одночасно:

$$G = 2\pi r \delta l \rho = \frac{Nl}{\frac{\sigma_B}{\rho}} \quad (3.3.3.20)$$

Для такого стержня критерієм оцінки матеріалу також є міцність. Найдемо товщину стінки труби:

$$\frac{\delta}{r} = \frac{N\pi kE}{4l^2 \sigma_B^2} \quad (3.3.3.21)$$

Кінцева ціль діяльності інженера при розрахунку є певна величина яку потрібно проаналізувати. Отже проаналізуємо товщину стінки полого алюмінієвого стержня з наступними характеристиками: $l = 1$ м, $k = 1$, $N = 10$ кН, $E = 7,2 \cdot 10^4$ МПа, $\sigma_B = 480$ МПа.

Звідси:

$$\frac{\delta}{r} = 0,0025$$

При обчисленні за умови $r = 20$ мм, товщина стінки труби має складати 0,05 мм. Але на практиці це є досить складним і трудоемким, що призведе до високої собівартості нашого елемента. Тому потрібно підібрати інший варіант виготовлення елемента. Підберемо пластину розмірами a і b , на яку діють наступні навантаження N_x, N_y, q_{xy} (Рис. 3.3.3.1).

Виконаємо розрахунок:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{\delta}; \sigma_y = \frac{N_y}{\delta}; \tau_{xy} = \frac{q_{xy}}{\delta} \quad (3.3.3.22)$$

За допомогою критеріїв максимальних напруги оцінюємо міцність (вважаємо пластину ізотропною) (рис. 3.3.3.1):

$$\tau_{xy} = \frac{q_{xy}}{\delta} \leq \tau_B \quad (3.3.3.23)$$

$$\delta = \max\left(\frac{N_x}{\sigma_B}; \frac{N_y}{\sigma_B}; \frac{q_{xy}}{\tau_B}\right) \quad (3.3.3.24)$$

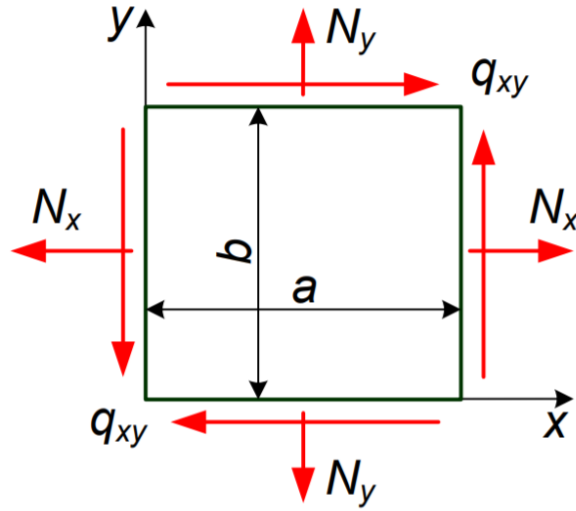


Рис. 3.3.3.1. Зображення діючих напружень в пластині

Визначаємо масу:

$$G = ab\delta\rho = ab \cdot \max\left(\frac{N_x}{\frac{\sigma_B}{\rho}}; \frac{N_y}{\frac{\sigma_B}{\rho}}; \frac{q_{xy}}{\frac{\tau_B}{\rho}}\right) \quad (3.3.3.25)$$

Робимо висновки про те, що маса обернено пропорційна міцності при навантаженні на стиск-розтяг та на зсув.

За формулою Мизеса- Хилла оцінюємо матеріал та вираховуємо масу матеріалу:

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_B^2} - \frac{\sigma_x\sigma_y}{\sigma_B^2} + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_B^2} + \frac{\tau_{xy}^2}{\tau_B^2} \leq 1 \quad (3.3.3.26)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{N_x^2}{\sigma_B^2} + \frac{N_x N_y}{\sigma_B^2} + \frac{N_y^2}{\sigma_B^2} + \frac{q_{xy}^2}{\tau_B^2}} \quad (3.3.3.27)$$

$$G = ab \sqrt{\frac{N_x^2}{\left(\frac{\sigma_B}{\rho}\right)^2} + \frac{N_x N_y}{\left(\frac{\sigma_B}{\rho}\right)^2} + \frac{N_y^2}{\left(\frac{\sigma_B}{\rho}\right)^2} + \frac{q_{xy}^2}{\left(\frac{\tau_B}{\rho}\right)^2}} \quad (3.3.3.28)$$

Для виготовлення аналогічної композитної пластини (із набором необхідних анізотропних властивостей), переводимо дані формули (3.3.3.25) та (3.3.3.28) до наступного виду:

$$G = ab \cdot \max\left(\frac{N_x}{\frac{F_x}{\rho}}; \frac{N_y}{\frac{F_y}{\rho}}; \frac{q_{xy}}{\frac{F_{xy}}{\rho}}\right) \quad (3.3.3.29)$$

$$G = ab \left(\frac{N_x^2}{\left(\frac{F_x}{\rho}\right)^2} - \frac{N_x N_y}{\frac{F_x}{\rho} \frac{F_y}{\rho}} - \frac{N_y^2}{\left(\frac{F_y}{\rho}\right)^2} + \frac{q_{xy}^2}{\left(\frac{F_{xy}}{\rho}\right)^2} \right) \quad (3.3.3.30)$$

F_x, F_y, F_{xy} — границі міцності по вісям x та y на стиск-розтяг та також зсув в площині пластини.

Нам відомо, що границі міцності залежать від структури використаного композита.

Інформація по структурі композита — це інформація про кількість слоїв, густини переплету волокон, методу переплету волокон, його армування та кутів напрямків волокон. Звідси можна сказати, що формули (3.3.3.29) та (3.3.3.30) можна використовувати тільки в тих випадках, коли нам відома інформація про товщину пакета δ та структуру композита. Оскільки при товщині пакета δ можна реалізувати багато варіантів набору структури композитного матеріалу, відповідно і міцносних наборів даних буде багато. В залежності від підбраної структури буде певна міцність матеріалу. Підбір необхідної структури композитного матеріалу — саме це і є фундаментальною задачею проектування конструкцій композитів.

3.3.4 Проектування структури волокон композиційного матеріалу

Композити представляють собою певну конструкцію з набором необхідних властивостей. Структура композиту досить часто включає в себе набір з волокон, що розміщені певним чином та матриці. На рівні однонаправленого монослоя композитного матеріалу до структурних параметрів відноситься об'ємна структура волокон та матриці. Композити з однонаправленими волокнами не часто використовуються в машинобудуванні. Майже майже всі сучасні елементи з композитних матеріалів створюються не з однонаправленого, а із слоїстого композитного матеріалу. Слоїстий композит зазвичай складається із наборів слоїв однонаправленого композиту, але викладка кожного слою здійснюється з різними кутами напрямку волокон.

Однонаправлені композитні матеріали є основою для виготовлення слоїстих композитних матеріалів. Опираючись на фізико-механічні характеристики однонаправлених композитних матеріалів, виконується підбір рівнів слоїв слоїстого композиту. Саме цей набір фізико-механічних характеристик однонаправлених композитних матеріалів в слоїстому композитному матеріалі і називається паспортом композита. Сюди входять наступні параметри:

- E_1, E_2, G_{12} — модулі пружності вздовж волокон, поперек волокон та на зсув по площині слою;

- $F_{1p}, F_{1c}, F_{2p}, F_{2c}, F_{12}$ — границі міцності вздовж та впоперек волокон, також на стиск-розтяг при зсуві;

- μ_{12}, μ_{21} — коефіцієнти Пуассона;

- α_1, α_2 — коефіцієнти лінійного температурного розширення;

- δ_0 — товщина монослою композитного матеріалу після формування;

- τ_{MC} — міцність при міжслойному зсуві;

- c_p , λ_1 , λ_2 — теплоємність та теплопровідність вздовж і поперек волокон і т.п.

Для прогнозування фізико-механічних властивостей композитного матеріалу з будь-якою викладкою нам достатньо знати інформацію про характеристики та параметри структури.

Як ми вже знаємо маса матеріалу буде залежати від структури композита. Починаючи з моменту використання композитних матеріалів найбільшою проблемою для інженерів стала орієнтація елементів композитного матеріалу. Як направляти волокна, які кути потрібно забезпечити, наскільки щільна викладка має бути і т.п.

Головною перевагою у використанні композитів над металевими сплавами є зменшення ваги. Але при цьому не має зменшитися несуча здатність елемента. Саме рішення даної проблеми і є фундаментальною задачею конструювання елементів з композитних матеріалів. Визначення кутів армування, товщин волокон армування, кількості слоїв і представляє процес підбору композитного матеріалу.

Досить часто при розрахунках критерій мінімальної маси беруть як головний критерій проектування. Тоді задача проектування структури композитного матеріалу зводиться до максимального зменшення функції маси, при умові дотримання міцності пакета:

$$G = \sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i \rightarrow \min \quad (3.3.4.1)$$

На перших етапах проектування ми не будемо брати до уваги форму та розміри елемента. Але зазвичай саме обмеження по прогину чи стійкості впливають на результат конструювання.

На початковому етапі конструювання ми маємо знайти параметри, що забезпечать міцність кожного слою. Руйнування одного слою композитного матеріалу приводить до руйнування цілого композитного матеріалу. В інженерії дане явище має назву «руйнування першого слою».

Під час прикладення навантаження кожен слой пакету сприймає дане навантаження. Розглянемо рисунок 3.3.4.1 із зображенням напрямків дії

напруження та схема формування місцевої системи координат 1-2. Вихідні вісі x та y повертаємо проти годинникової стрілки на кут φ_1 . У нашому випадку порядок викладення слоїв композитного матеріалу не має значення, адже ми нехтуємо формою та розмірами елемента конструювання. Досить часто такий метод конструювання інженери називають точковим конструюванням (рис. 3.3.4.1).

Для оцінки міцності використаємо критерії міцності. Найбільш розповсюдженими серед критеріїв міцності можна назвати «критерій максимальних напружень» та «критерій Мізеса –Хілла». Принцип критерія максимальних напружень полягає в тому, що в жодному слої і по жодному з напрямків напруження не має досягати свого критичного значення.

$$\sigma_{1i} \leq F_{1i}; \sigma_{2i} \leq F_{2i}; \tau_{12} \leq F_{12i}; \quad (3.3.4.2)$$

Принцип критерія Мізеса –Хілла полягає в тому, що в жодному слої не має наступати граничне напруження.

$$\frac{\sigma_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{F_{12i}^2} \leq 1 \quad (3.3.4.3)$$

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} = \sigma_{1i} \geq 0 \\ F_{1ic} = \sigma_{1i} < 0 \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} = \sigma_{2i} \geq 0 \\ F_{2ic} = \sigma_{2i} < 0 \end{cases} \quad (3.3.4.4)$$

$$\begin{aligned} F_{1ic} &\leq \sigma_{1i} \leq F_{1ip} \\ F_{2ic} &\leq \sigma_{2i} \leq F_{2ip} \\ \tau_{12i} &\leq F_{12i} \end{aligned} \quad (3.3.4.5)$$

У паспорті матеріалу досить часто вказують абсолютні значення границь міцності на стиск. Для спрощення розрахунків на міцність будемо користуватися формулою (3.3.4.2). Головне під час проведення розрахунків правильно трактувати фізичний зміст умов міцності.

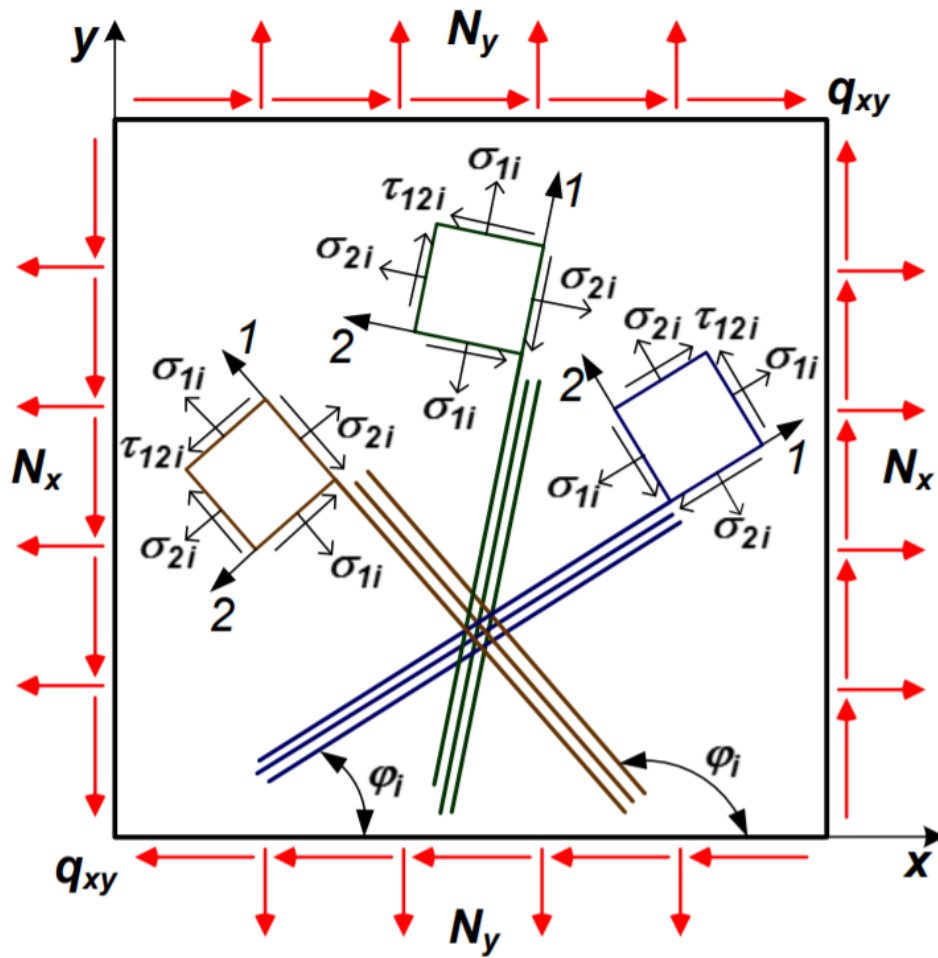


Рис. 3.3.4.1. Зображення структури слоїстого композиційного матеріалу

Існує певний порядок визначення в слоях діючі напруження в місцевій системі координат.

Рівняння фізичного закону:

$$\begin{aligned}\sigma_{1i} &= \vec{E}_{1i}(\varepsilon_{1i} + \mu_{21i}\varepsilon_{2i}) \\ \sigma_{2i} &= \vec{E}_{2i}(\varepsilon_{2i} + \mu_{12i}\varepsilon_{1i}) \\ \tau_{12i} &\leq G_{12i}\gamma_{12i}\end{aligned}\quad (3.3.4.6)$$

За умови спільної деформації слоїв пакета визначаємо деформації ε_{1i} , ε_{2i} , γ_{12i} :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1i} &= \varepsilon_x \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_y \sin^2 \varphi_i + \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i \\ \varepsilon_{2i} &= \varepsilon_x \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_y \sin^2 \varphi_i - \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i \\ \gamma_{12i} &= (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \sin 2\varphi_i + \gamma_{xy} \cos 2\varphi_i\end{aligned}\quad (3.3.4.7)$$

Комбінація даних формул і є фізичним законом для пакета.

$$\varepsilon_x = \frac{N_x B_{22} - N_y B_{12}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} - \frac{N_y B_{12} B_{11}}{(B_{11} B_{22} - B_{12}^2) B_{11}}; \gamma_{xy} = \frac{q_{xy}}{B_{33}} \quad (3.3.4.8)$$

Аналогічно

Підставимо формули (3.3.4.7) у рівняння (3.3.4.6):

$$\varepsilon_x = \frac{N_x B_{22} - N_y B_{12}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} - \frac{N_y B_{12} B_{11}}{(B_{11} B_{22} - B_{12}^2) B_{11}} = \frac{N_x}{B_{11} - \frac{B_{12}^2}{B_{22}}} - \frac{N_y \frac{B_{12}}{B_{11}}}{B_{22} - \frac{B_{12}^2}{B_{11}}} = \frac{N_x}{E_x \delta_\Sigma} - \frac{N_y}{E_y \delta_\Sigma} \mu_{yx} = \frac{\sigma_x}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1i} &= \vec{E}_{1i} [\varepsilon_x (\cos^2 \varphi_i + \mu_{21i} \sin^2 \varphi_i) + \varepsilon_y (\sin^2 \varphi_i + \mu_{21i} \cos^2 \varphi_i) + \gamma_{xy} (1 - \mu_{21i}) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] \\ \sigma_{2i} &= \vec{E}_{2i} [\varepsilon_x (\sin^2 \varphi_i + \mu_{12i} \cos^2 \varphi_i) + \varepsilon_y (\cos^2 \varphi_i + \mu_{12i} \sin^2 \varphi_i) + \gamma_{xy} (\mu_{12i} - 1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] \end{aligned} \quad (3.3.4.9)$$

$$\tau_{12i} = G_{12i} [(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \sin 2\varphi_i + \gamma_{xy} \cos 2\varphi_i]$$

Переходимо до канонічної форми запису:

$$\begin{aligned} \sigma_{1i} &= \varepsilon_x a_{11i} + \varepsilon_y a_{12i} + \gamma_{xy} a_{13i} \\ \sigma_{2i} &= \varepsilon_x a_{21i} + \varepsilon_y a_{22i} + \gamma_{xy} a_{23i} \\ \tau_{12i} &= \varepsilon_x a_{31i} + \varepsilon_y a_{32i} + \gamma_{xy} a_{33i} \end{aligned} \quad (3.3.4.10)$$

Підставляємо формулу (3.3.4.8) в (3.3.4.10) та запишемо умову міцності (3.3.4.2) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} N_x \frac{B_{22} a_{11i} - B_{12} a_{12i}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} + N_y \frac{B_{11} a_{12i} - B_{12} a_{11i}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} + q_{xy} \frac{a_{13i}}{B_{33}} &\leq F_{1i} \\ N_x \frac{B_{22} a_{21i} - B_{12} a_{22i}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} + N_y \frac{B_{11} a_{22i} - B_{12} a_{21i}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} + q_{xy} \frac{a_{23i}}{B_{33}} &\leq F_{2i} \\ N_x \frac{B_{22} a_{31i} - B_{12} a_{32i}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} + N_y \frac{B_{11} a_{32i} - B_{12} a_{31i}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} + q_{xy} \frac{a_{33i}}{B_{33}} &\leq F_{12} \end{aligned} \quad (3.3.4.11)$$

Таким чином, умова міцності, що записана через навантаження N_x , N_y та q_{xy} та структурні параметри n , δ_i та φ_i , та з формули жорсткості B_{11} , B_{22} , B_{12} , B_{33} .

На основі критерія Мізеса –Хілла після підстановки формул (3.3.4.8), (3.3.4.9) в (3.3.4.3) отримуємо умови міцності:

$$\begin{aligned}
& N_x^2 \frac{A_{1i}B_{22}^2 + A_{2i}B_{12}^2 - A_{4i}B_{22}B_{12}}{(B_{11}B_{22} + B_{12}^2)^2} + N_y^2 \frac{A_{1i}B_{12}^2 + A_{2i}B_{11}^2 - A_{4i}B_{11}B_{12}}{(B_{11}B_{22} + B_{12}^2)^2} + q_{xy}^2 \frac{A_{3i}}{B_{33}^2} + \\
& N_x N_y \frac{A_{4i}(B_{11}B_{22} + B_{12}^2) - 2A_{1i}B_{12}B_{22} - 2A_{2i}B_{11}B_{12}}{(B_{11}B_{22} + B_{12}^2)^2} + N_x q_{xy} \frac{A_{5i}B_{22} - A_{6i}B_{12}}{B_{33}(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} + \\
& N_y q_{xy} \frac{A_{6i}B_{11} - A_{5i}B_{12}}{B_{33}(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \leq 1
\end{aligned} \tag{3.3.4.12}$$

$$\begin{aligned}
A_{1i} &= d_{1i} \cos^4 \varphi_i + d_{2i} \sin^4 \varphi_i + (4d_{3i} + d_{4i}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i \\
A_{2i} &= d_{1i} \sin^4 \varphi_i + d_{2i} \cos^4 \varphi_i + (4d_{3i} + d_{4i}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i \\
A_{3i} &= (d_{1i} + d_{2i} - d_{4i}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + d_{3i} \cos^2 \varphi_i
\end{aligned} \tag{3.3.4.13}$$

$$\begin{aligned}
A_{4i} &= 2(d_{1i} + d_{2i} - d_{4i}) \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i + d_{4i}(\sin^4 \varphi_i + \cos^4 \varphi_i) \\
A_{5i} &= \sin \varphi_i \cos \varphi_i [\cos^2 \varphi_i (2d_{1i} + 4d_{3i} - d_{4i}) - \sin^2 \varphi_i (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] \\
A_{6i} &= \sin \varphi_i \cos \varphi_i [\sin^2 \varphi_i (2d_{1i} + 4d_{3i} - d_{4i}) - \cos^2 \varphi_i (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] \\
d_{1i} &= \vec{E}_{1i}^2 \left(\frac{1}{F_{1i}^2} + \frac{\mu_{21i}^2}{F_{2i}^2} - \frac{\mu_{21i}}{F_{1i}F_{2i}} \right); d_{2i} = \vec{E}_{1i}^2 \left(\frac{1}{F_{1i}^2} + \frac{\mu_{12i}^2}{F_{2i}^2} - \frac{\mu_{12i}}{F_{1i}F_{2i}} \right); d_{3i} = \frac{G_{12i}^2}{F_{12i}^2}; d_{4i} = \\
& \vec{E}_{1i} \vec{E}_{2i} \left(\frac{2\mu_{12i}}{F_{1i}^2} + \frac{2\mu_{21i}}{F_{2i}^2} + \frac{1 - \mu_{21i}\mu_{12i}}{F_{1i}F_{2i}} \right)
\end{aligned} \tag{3.3.4.14}$$

Підставляючи формулу (3.3.4.13) в (3.3.4.12) отримуємо наступне:

$$\begin{aligned}
& \cos^4 \varphi_i (d_{1i} \varepsilon_x^2 + d_{2i} \varepsilon_y^2 + d_{4i} \varepsilon_x \varepsilon_y) + \sin^4 \varphi_i (d_{1i} \varepsilon_y^2 + d_{2i} \varepsilon_x^2 + d_{4i} \varepsilon_x \varepsilon_y) + \\
& \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i [4d_{3i} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + d_{4i} (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + 2\varepsilon_x \varepsilon_y (d_{1i} + d_{2i})] + \\
& \gamma_{xy}^2 [d_{3i} + \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i (d_{1i} + d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\
& \gamma_{xy}^4 \sin \varphi_i \cos \varphi_i \{ \cos^2 \varphi_i [\varepsilon_x (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_y (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\
& \sin^2 \varphi_i [\varepsilon_y (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_x (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] \} \leq 1
\end{aligned} \tag{3.3.4.15}$$

Оскільки функція $\sin x$ – непарна, $\sin(-\varphi_i) = -\sin \varphi_i$, умова міцності для слоїв можуть бути різними $+\varphi_i$ і $-\varphi_i$.

При вирішенні задач по оптимізації структури ми можемо керуватися формулами (3.3.4.11), (3.3.4.12) та (3.3.4.15). Також вони слугують для оцінки запасів міцності слоїв і паркету в цілому та прогнозування границь міцності пакета з довільною структурою, ортотропного по вісям x та y .

3.3.5 Оптимальне проектування структури композитного матеріалу

Проведемо наступні розрахунки параметрів композиційних матеріалів, таких як δ_i , φ_i та n . Розрахунки мають проводитися з обов'язковою умовою мінімізації маси композиційного матеріалу. В інженерії подібні задачі мають назву «оптимізуючі».

З математичної точки зору задача полягає в тому, щоб знайти параметри структури композиційного матеріалу, а саме параметрів δ_i , φ_i та n , в функції, що прямує до мінімального свого значення:

$$G = \sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i \rightarrow \min \quad (3.3.5.1)$$

При виконанні умови міцності по критерію Мізеса-Хілла:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{пр}} = & \cos^4 \varphi_i (d_{1i} \varepsilon_x^2 + d_{2i} \varepsilon_y^2 + d_{4i} \varepsilon_x \varepsilon_y) + \sin^4 \varphi_i (d_{1i} \varepsilon_y^2 + d_{2i} \varepsilon_x^2 + d_{4i} \varepsilon_x \varepsilon_y) - \\ & \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i \left[4d_{3i} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + d_{4i} (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + 2\varepsilon_x \varepsilon_y (d_{1i} + d_{2i}) \right] + \\ & \gamma_{xy}^2 [d_{3i} + \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i (d_{1i} + d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\ & \gamma_{xy}^4 \sin \varphi_i \cos \varphi_i \{ \cos^2 \varphi_i [\varepsilon_x (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_y (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\ & \sin^2 \varphi_i [\varepsilon_y (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_x (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] \} \leq 1 \end{aligned} \quad (3.3.5.2)$$

Потрібно також враховувати ще одну умову цілого числа монослоїв. Ця конструктивно-технологічна умова вводиться тепер, адже до цього ми вважали, що товщина може бути будь-якою, δ_0 - дуже мале неперервне число. Для таких функцій традиційний математичний аналіз не підходить, тому виникає проблема з диференціюванням функції численного аргумента, який може виступати тільки цілим числом.

Даний пошук мінімальної маси при обмеженнях у вигляді набору нерівностей являє собою складну математичну задачу. Цю задачу ускладнює ще й той момент, що кількість цих обмежень n невідома.

Рівняння має певну кількість коренів, а при обчисленні нерівностей результатом є набір інтервалів допустимих значень (нескінченна кількість рішень). Тому при підборі структури для композиційного матеріалу, коефіцієнти запасу міцності, що могли б бути мінімальними, а в межі –

рівними одиниці, з умови міцності для композиційних матеріалів (3.3.5.2) можуть бути взяті у вигляді рівності. На даному етапі суть пошуку оптимальної структури полягає в пошуку не в усіх можливих варіантах, а серед рівних за властивостями. Тобто тими, що характеризуються одночасним руйнуванням всіх слоїв. Тому на даному етапі можна сказати, що смисл пошуку відмінний від попереднього етапу.

Задамо математичне формулювання задачі для проведення оптимізації структури композиційних матеріалів з однаковим матеріалом в слоях. Така задача спрямована для знаходження δ_i , φ_i та n , які забезпечують мінімальне значення функції:

$$G = \rho \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3.3.5.3)$$

при забезпеченні виконання наступних умов

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{пр}} = & \cos^4 \varphi_i (d_{1i} \varepsilon_x^2 + d_{2i} \varepsilon_y^2 + d_{4i} \varepsilon_x \varepsilon_y) + \sin^4 \varphi_i (d_{1i} \varepsilon_y^2 + d_{2i} \varepsilon_x^2 + \\ & d_{4i} \varepsilon_x \varepsilon_y) + \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i \left[4d_{3i} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + d_{4i} (\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + 2\varepsilon_x \varepsilon_y (d_{1i} + \right. \\ & \left. d_{2i}) \right] + \gamma_{xy}^2 [d_{3i} + \sin^2 \varphi_i \cos^2 \varphi_i (d_{1i} + d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\ & \gamma_{xy}^4 \sin \varphi_i \cos \varphi_i \{ \cos^2 \varphi_i [\varepsilon_x (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_y (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\ & \sin^2 \varphi_i [\varepsilon_y (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_x (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] \} \leq 1 \end{aligned} \quad (3.3.5.4)$$

Розрахунок проводиться на ортотропному пакеті, де слою з армуванням волокон $+\varphi$ відповідає подібний слой $-\varphi$. Варто уточнити, що товщина слоїв рівна між собою. Умови міцності будуть виконуватися при умовах $\varphi = 0$ та $\varphi = \pi/2$. Із (4.4) ми бачимо що дана умова не виконується для слоїв $+\varphi$ та $-\varphi$ (оскільки $\sin \varphi_1$ — непарна функція). Виведемо умову при якій забезпечення міцності в слої $+\varphi$ гарантує забезпечення міцності і для слоя $-\varphi$.

$$\Phi_{\text{пр}}(+\varphi) > \Phi_{\text{пр}}(-\varphi) \quad (3.3.5.5)$$

Оскільки $\sin^2 \varphi$ та $\sin^4 \varphi$ — парні, то:

$$\begin{aligned} & \gamma_{xy}^4 \sin 2\varphi \{ \cos^2 \varphi [\varepsilon_x (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_y (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] + \\ & \sin^2 \varphi_i [\varepsilon_y (2d_{1i} - 4d_{3i} - d_{4i}) - \varepsilon_x (2d_{2i} - 4d_{3i} - d_{4i})] \} \\ & > 0 \end{aligned} \quad (3.3.5.6)$$

Скорочуємо на $\sin 2\varphi$, при $\varphi \neq 0, \varphi \neq 90$. Знак зберігаємо, адже

$$0 < \varphi < \pi/2, \sin 2\varphi > 0:$$

Пошук кута φ проводимо в інтервалі

$$0 < \varphi < \pi/2 \quad (3.3.5.7)$$

Нехай кількість слоїв прагне до нескінченності $n \rightarrow \infty$ (індекс i при φ зникає).

У рівнянні (3.3.5.4) домножуємо останній член на $(\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi)^2$ та ділимо на $\sin^4 \varphi$ або $\cos^4 \varphi$ та отримаємо рівняння четвертого порядку. Таке рівняння має чотири корені, всі з яких можуть виступати дійсними числами. Говорячи іншими словами в пакеті із нескінченної кількості слоїв існує чотири слої які є між собою рівносильними. Система має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{пр}1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4) &= 0 \\ \Phi_{\text{пр}2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4) &= 0 \\ \Phi_{\text{пр}3}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4) &= 0 \\ \Phi_{\text{пр}4}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4) &= 0 \end{aligned} \quad (3.3.5.8)$$

Розуміється що коефіцієнти є між собою рівносильними, для того, щоб корені були рівносильними:

$$\varphi_{1k} = \varphi_{2k} = \varphi_{3k} = \varphi_{4k} \quad (3.3.5.9)$$

k — порядковий номер кореня.

Переведемо у вигляд неперервної функції:

$$\Phi_{\text{пр}}(\varphi) = 0 \quad (3.3.5.10)$$

Зіставимо нову функцію для того, щоб зручно було проводити пошук екстремумів функції за методом невизначених множників Лагранжа:

$$L = \rho \sum_{i=1}^n \delta_i + \lambda \Phi_{\text{пр}}(\varphi) \quad (3.3.5.11)$$

λ — функція шуканих параметрів (множник Лагранжа).

Система рівнянь набуває наступного виду:

$$\frac{\partial L}{\partial \delta_i} = 0; \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \quad (3.3.5.12)$$

Добавляємо умову зв'язку (3.3.5.10), а з (3.3.5.12), що $\Phi_{\text{пр}}(\varphi) \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} + \lambda \frac{\partial \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi} = 0$. $\Phi_{\text{пр}}(\varphi) = 0$.

$$\frac{\partial \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi} = 0 \quad (3.3.5.13)$$

$$\Phi_{\text{пр}}(\varphi) = 0; \frac{\partial \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi} = 0 \quad (3.3.5.14)$$

Як згадувалося вище, рівняння має чотири корені (чотири точки екстремуму), тобто наш композитний матеріал має чотири слої. Чотири точки відображено на рисунку 3.3.5.1, де можна побачити, що дві точки будуть виступати як максимуми функції та інші дві як мінімуми функції.

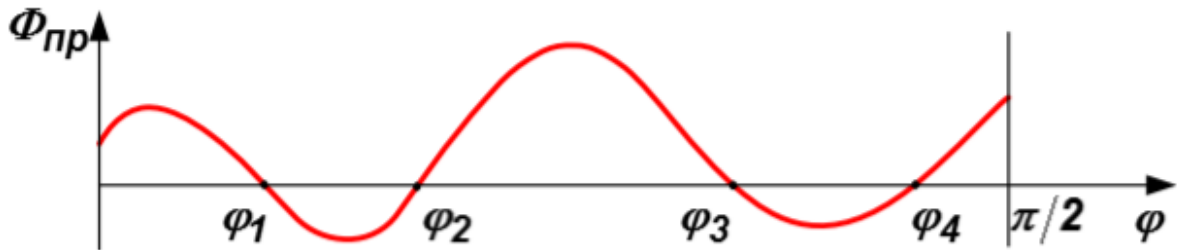


Рис. 3.3.5.1. Зображення графіка функції задачі для визначення структури композиційного матеріалу

При оптимальних кутах армування із формули (3.3.5.14) можемо побачити, що функція та її похідна рівні нулю, а графік міцності (3.3.5.4) приймає інший вид (рис. 3.3.5.2).

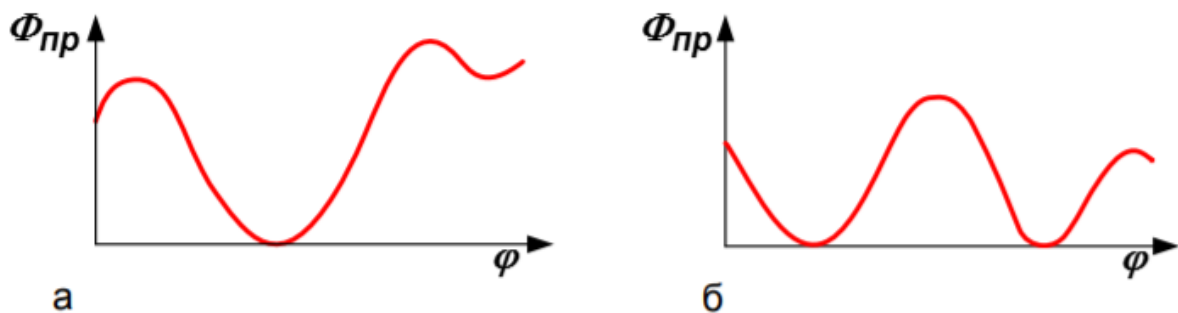


Рис. 3.3.5.2. Зображення графіка функції задачі при виборі структур композиційного матеріалу

Звідси робимо висновок, що структури $[\pm\varphi][\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$ є оптимальними.

Рішенням задачі стала не кількісна а якісна інформація про структуру композиційного матеріалу. З цієї інформації можна визначити тип чи клас оптимальної структури матеріалу.

Для визначення параметрів $\delta_1, \delta_2, \varphi_1, \varphi_2$, структури $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$ варто розглянути ще одну задачу. До умов задачі додатково вводяться коефіцієнти жорсткості B_{11}, B_{22}, B_{12} та B_{33} , що залежать від шуканих параметрів.

Розглянемо ще один приклад задачі, коли на балку діє лише зсуваюче зусилля (рис. 3.3.5.3).

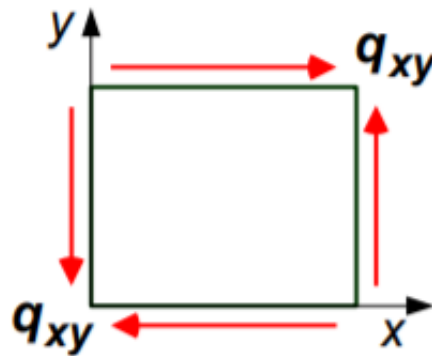


Рис. 3.3.5.3. Навантаження сзуву на композиційний матеріал

Функція із (3.3.5.4) та її похідна приймають наступний вигляд:

$$\Phi_{\text{пр}} = \gamma_{xy}^2 [d_3 + \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi (d_1 + d_2 - 4d_3 - d_4)] - 1 = 0$$

$$\frac{\partial \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi} = \gamma_{xy}^2 \sin 2\varphi \cos 2\varphi (d_1 + d_2 - d_3 - d_4) = 0 \quad (3.3.5.15)$$

Екстремуми:

$$\varphi = 0; \varphi = \frac{\pi}{2}; \varphi = \pi/4 \quad (3.3.5.16)$$

Візьмемо подвійну похідну та обчислимо її значення в точках екстремумів для виявлення набору характеристик композиційного матеріалу.

$$\frac{\partial^2 \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi^2} = 2\gamma_{xy}^2 \cos 4\varphi (d_1 + d_2 - 4d_3 - d_4) \quad (3.3.5.17)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi^2} \right|_{\varphi=0} = \left. \frac{\partial^2 \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi^2} \right|_{\varphi=\pi/2} = 22\gamma_{xy}^2(d_1 + d_2 - 4d_3 - d_4)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \Phi_{\text{пр}}}{\partial \varphi^2} \right|_{\varphi=\pi/4} = -22\gamma_{xy}^2(d_1 + d_2 - 4d_3 - d_4) \quad (3.3.5.18)$$

Графіки функцій $\Phi_{\text{пр}}(\varphi)$ залежить від знаку виразу $(d_1 + d_2 - 4d_3 - d_4)$ (рис. 3.3.5.4).

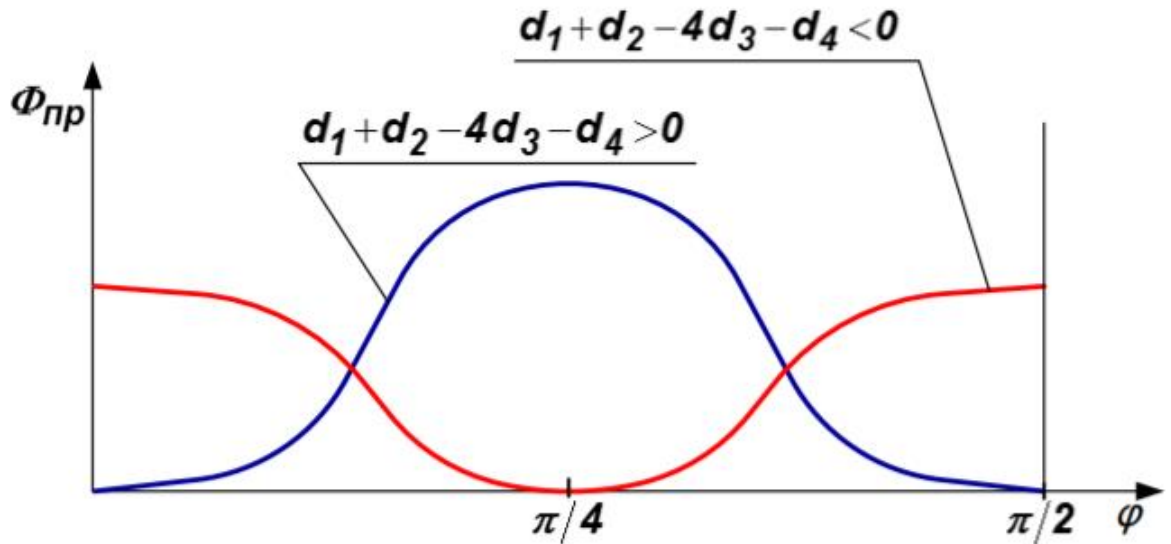


Рис. 3.3.5.4. Графік при виборі оптимальної структури композиційного матеріалу

Від характеру функції залежить і структура композиційного матеріалу. В одному випадку це можуть бути однонаправлені або ортогонально-армовані композиційні матеріали $[0],[90]$, в іншому перехресно направлені $[\pm 45]$.

В (3.3.5.15) виконуємо підстановку

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} = \frac{\tau_{xy} \delta}{B_{33}} = \frac{\tau_{xy}}{[\vec{E}_{1i}(1+\mu_{21}) + \vec{E}_{2i}(1+\mu_{12})] \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \cos^2 2\varphi} \quad (3.3.5.19)$$

Отримана формула для визначення границі міцності на зсув має наступний вид:

$$F_{xy} = \frac{[\vec{E}_{1i}(1+\mu_{21}) + \vec{E}_{2i}(1+\mu_{12})] \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \cos^2 2\varphi}{\sqrt{d_3 + \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi (d_1 + d_2 - 4d_3 - d_4)}} \quad (3.3.5.20)$$

Відобразимо графічно даний процес (рис. 3.3.5.5).

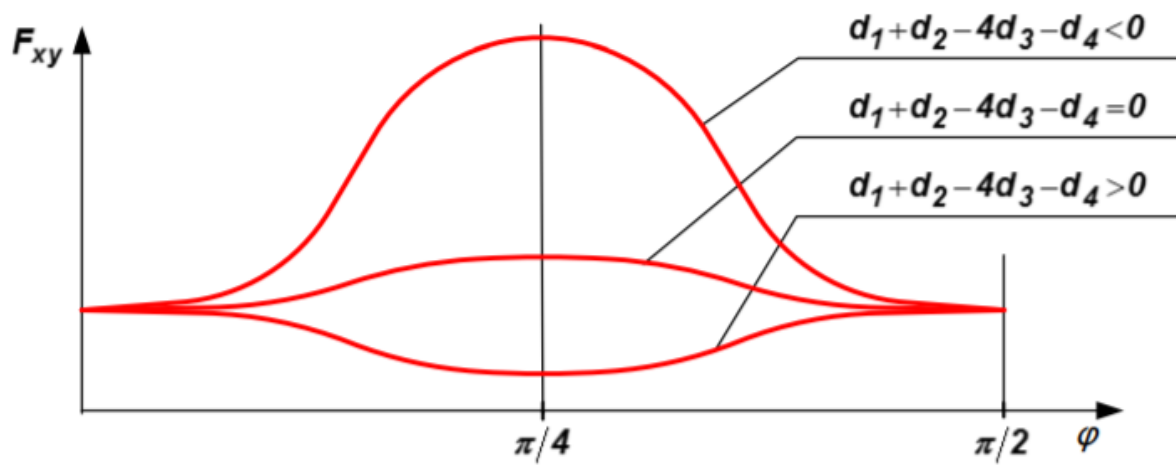


Рис. 3.3.5.5. Графік залежності границі міцності на сзув від фізико-механічних характеристик і структурних параметрів композиційних матеріалів

3.3.6 Проектування структури композита при складній схемі армування

Наступним кроком стане проектування структури композиційного матеріалу, який сприймає лише нормальне навантаження (рис. 3.3.6.1).

При умові $q_{xy}=0$, рівняння $\Phi_{пр}(\varphi) = 0$,

$$\Phi_{пр}(\varphi) = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi_{пр}}{\partial \varphi} = 0 \quad (3.3.6.1)$$

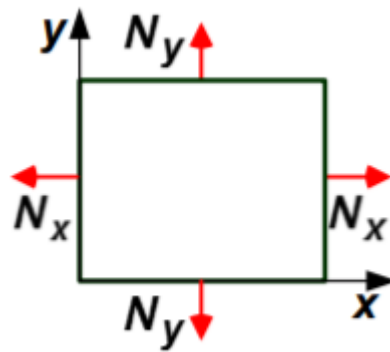


Рис. 3.3.6.1. Двохсторонній розтяг пакета композитного матеріалу

$$\begin{aligned} \Phi_{пр} = & \cos^4 \varphi (d_1 \varepsilon_x^2 + d_2 \varepsilon_y^2 + d_4 \varepsilon_x \varepsilon_y) + \sin^4 \varphi (d_1 \varepsilon_x^2 + d_2 \varepsilon_y^2 + \\ & + d_4 \varepsilon_x \varepsilon_y) + \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi [(4d_3 + d_4)(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + 2\varepsilon_x \varepsilon_y (d_1 + d_2 - \\ & - 4d_3)] - 1 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{пр}}{\partial \varphi} = & -2\sin 2\varphi \cos^2 \varphi (d_1 \varepsilon_x^2 + d_2 \varepsilon_y^2 + d_4 \varepsilon_x \varepsilon_y) + 2\sin 2\varphi \sin^2 \varphi (d_1 \varepsilon_x^2 + \\ & + d_2 \varepsilon_y^2 + d_4 \varepsilon_x \varepsilon_y) + 2\sin 2\varphi \cos 2\varphi [(4d_3 + d_4)(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2) + 2\varepsilon_x \varepsilon_y (d_1 + d_2 - \\ & - 4d_3)] = 0 \end{aligned} \quad (3.3.6.2)$$

У функції $\Phi_{пр}(\varphi)$ є три екстремуми при умовах $\Phi_{пр}(\varphi) = 0$,

$$\Phi_{пр}(\varphi) = \pi/2:$$

$$\varphi = 0; \quad \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi = \arctg \sqrt{\frac{\varepsilon_x(2d_1 - 4d_3 - d_4) - \varepsilon_y(2d_2 - 4d_3 - d_4)}{\varepsilon_x(2d_2 - 4d_3 - d_4) - \varepsilon_y(2d_1 - 4d_3 - d_4)}} \quad (3.3.6.3)$$

Зобразимо графіки функції $\Phi_{пр}(\varphi)$. Як результат можна побачити, що структури $[0][90],[0/90][\pm\varphi]$ є найоптимальнішим варіантом для використання (рис. 3.3.6.2).

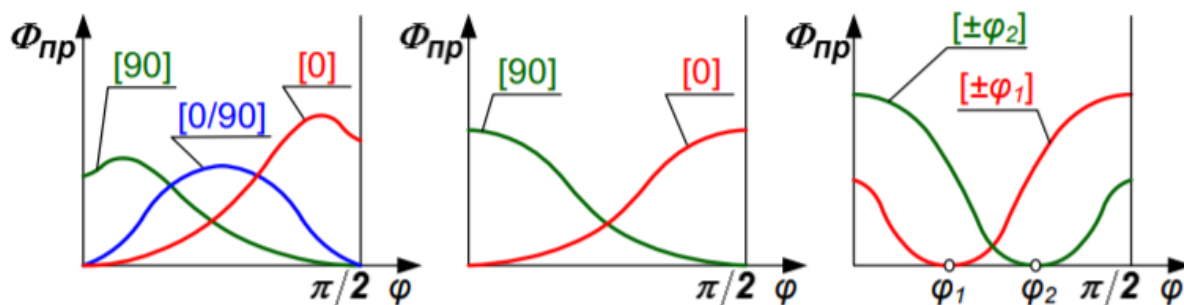


Рис. 3.3.6.2. Варіанти графіки функції $\Phi_{пр}(\varphi)$

Отже, рішення системи рівнянь (3.3.6.1) з такими навантаженнями як зсув або ж відсутність сзуваючих зусиль підтверджує можливість підбору оптимальної структури композиційного матеріалу. Варто почати проектувати пакет зі направленими слоями в структурі $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$. Структура композиційного матеріалу описується чотирьома параметрами.

Виконаємо наступну задачу по оптимізації параметрів структури $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$. Знайдемо значення товщини та кутів армування, знаючи тип оптимальної структури.

Нам відомо, що при використанні в слоях пакета одного і того ж матеріалу, товщина пакету буде мінімальною. Тому вводимо наступні позначення:

$$\delta_1 = \delta_2; \delta_3 = \delta_4 \quad (3.3.6.4)$$

$$2\delta_1 = 2\delta_2 = \psi\delta; 2\delta_3 = 2\delta_4 = (1 - \psi)\delta \quad (3.3.6.5)$$

Де $\delta = 2\delta_1 + 2\delta_3$ — сумарна товщина пакета;

δ_1, δ_2 — товщина армування в слої пакета $\pm\varphi_1$;

δ_3, δ_4 — товщина армування в слої пакета $\pm\varphi_2$.

Тому із врахуванням коефіцієнтів жорсткості $B_{11}, B_{22}, B_{12}, B_{33}$:

$$B_{11} = 2\delta_1(\vec{E}_1 \cos^4 \varphi_1 + \vec{E}_2 \sin^4 \varphi_1 + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + G_{12} \sin^2 2\varphi_1) + \\ 2\delta_3(\vec{E}_1 \cos^4 \varphi_2 + \vec{E}_2 \sin^4 \varphi_2 + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_2 \cos^2 \varphi_2 + G_{12} \sin^2 2\varphi_2) = \\ \delta[\psi(\vec{E}_1 \cos^4 \varphi_1 + \vec{E}_2 \sin^4 \varphi_1 + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + G_{12} \sin^2 2\varphi_1) + (1 - \\ \psi)(\vec{E}_1 \cos^4 \varphi_2 + \vec{E}_2 \sin^4 \varphi_2 + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_2 \cos^2 \varphi_2 + G_{12} \sin^2 2\varphi_2)]$$

$$B_{22} = \delta[\psi(\vec{E}_1 \sin^4 \varphi_1 + \vec{E}_2 \cos^4 \varphi_1 + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + \\ G_{12} \sin^2 2\varphi_1) + (1 - \psi)(\vec{E}_1 \sin^4 \varphi_2 + \vec{E}_2 \cos^4 \varphi_2 + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_2 \cos^2 \varphi_2 + \\ G_{12} \sin^2 2\varphi_2)] \quad (3.3.6.6)$$

Розрахуємо деформацію пакета:

$$B_{12} = \delta[\psi(\vec{E}_1 \\ + \vec{E}_2)(\sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1) + 2\vec{E}_1\mu_{21} \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + G_{12} \sin^2 2\varphi_1) + \\ (1 - \psi)(\vec{E}_1 \\ + \vec{E}_2) \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 \\ + \vec{E}_1\mu_{21}(\sin^4 \varphi_2 + \cos^4 \varphi_2) - G_{12} \sin^2 2\varphi_2)] \\ B_{33} = \delta[\psi(\vec{E}_1 + \vec{E}_2 - 2\vec{E}_1\mu_{21}) \sin^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_1 + G_{12} \cos^2 2\varphi_1) + \\ = (1 - \psi)(\vec{E}_1 + \vec{E}_2 - 2\vec{E}_1\mu_{21}) \sin^2 \varphi_2 \cos^2 \varphi_2 + G_{12} \cos^2 2\varphi_2)] \\ \varepsilon_x = \frac{N_x B_{22} - N_y B_{12}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} = \frac{1}{\delta} A_x; \quad \varepsilon_y = \frac{N_y B_{11} - N_x B_{12}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2} = \frac{1}{\delta} A_y; \quad \gamma_{xy} = \frac{q_{xy}}{B_{33}} = \frac{1}{\delta} A_{xy} \quad (3.3.6.7)$$

Із рівняння бачимо, що коефіцієнти A_x, A_y, A_{xy} є функціями трьох шуканих параметрів — ψ, φ_1 та φ_2 .

Для визначення напружень підставимо залежності (5.7) у формули:

$$\sigma_{1i} = \frac{\vec{E}_1}{\delta} [A_x(\cos^2 \varphi_i + \mu_{12} \sin^2 \varphi_i) + A_y(\sin^2 \varphi_i + \mu_{12} \cos^2 \varphi_i) + A_{xy}(1 \\ - \mu_{12}) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] \\ \sigma_{2i} = \frac{\vec{E}_2}{\delta} [A_x(\sin^2 \varphi_i + \mu_{12} \cos^2 \varphi_i) + A_y(\cos^2 \varphi_i + \mu_{12} \sin^2 \varphi_i) + A_{xy}(\mu_{12} - \\ 1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] \quad (3.3.6.8)$$

Виразимо залежності в наступному вигляді:

$$\sigma_{1i} = \frac{A_{1i}}{\delta}; \quad \sigma_{2i} = \frac{A_{2i}}{\delta}; \quad \tau_{12i} = \frac{A_{12i}}{\delta} \quad (3.3.6.9)$$

Зіставивши рівняння (3.3.6.8) та (3.3.6.9) виконаємо підстановку в рівняння критерію Мізеса-Хілла для визначення товщини пакета:

$$\frac{A_{1i}^2}{\delta^2 F_{1i}^2} - \frac{A_{1i}A_{2i}}{\delta^2 F_{1i}F_{2i}} + \frac{A_{2i}^2}{\delta^2 F_{2i}^2} + \frac{A_{1i}^2}{F_{12i}^2} \leq 1, i = 1, \dots, 4 \quad (3.3.6.10)$$

$$\delta = \max_{i=1,2,3,4} \sqrt{\frac{A_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{A_{1i}A_{2i}}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{A_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{A_{1i}^2}{F_{12i}^2}} \quad (3.3.6.11)$$

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1ip} = A_{1i} \geq 0 \\ F_{1ic} = A_{1i} < 0 \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2ip} = A_{2i} \geq 0 \\ F_{2ic} = A_{2i} < 0 \end{cases} \quad (3.3.6.12)$$

$$F_{121} = F_{122} = F_{123} = F_{12} \quad (3.3.6.13)$$

Ми зіштовхуємося із проблемою обчислення оптимальних значень ψ , φ_1 та φ_2 використовуючи методи математичного аналізу для системи рівнянь:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \psi} = 0; \quad \frac{\partial \delta}{\partial \psi_1} = 0; \quad \frac{\partial \delta}{\partial \psi_2} = 0 \quad (3.3.6.14)$$

Адже система рівнянь має порядок вище п'ятого і аналітично не обчислюється. Тому ми використаємо метод пошуку екстремумів функції.

Шукані параметри не можуть мати будь яке значення і також вони знаходяться в певних інтервалах:

$$0 \leq \psi \leq 1; 0 \leq \psi_1 \leq \frac{\pi}{2}; 0 \leq \psi_2 \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.3.6.15)$$

Використаємо метод «перебору в циклі». Границі у нас відомі за формулою (3.3.6.15) для ψ , φ_1 та φ_2 . Задаємо числові значення для ψ , φ_1 та φ_2 та за формулою (3.3.6.15) визначимо товщину пакета. Щоразу варто записувати мінімальні значення товщин і відповідні параметри цій товщині.

3.3.7 Проектування структури композиційного матеріалу за критерієм максимальних напружень

Нам відомо, що при підборі параметрів конструкції окремо за першою та третьою теоріями міцності приведе до різних значень результатів. Також зіштовхуємося із ще однією складністю, адже прогнозовані границі міцності слоїстих композиційних матеріалів на основі різних міцносних критерії відрізняються між собою. У таких випадках розумним рішенням є підхід до рішення задачі проектування на основі будь-якого іншого критерія міцності з аналізом результатів в подальшому.

Нехай по критерію Мізеса-Хілла товщина пакета буде відрізнятися від значення товщини по критерію максимальних напружень структури композиційного матеріалу. Важливим моментом стає те чи зберігся, чи змінився тип структури композиційного матеріалу. При збереженні класу і типу конструкції композиційного матеріалу розрахунок спроститься для нас. Адже, якщо тип композиту зміниться, то нас доведеться навести аргументи того чи іншого вибору критерію.

У випадках, коли розрахунок товщини по одному критерію дає менше числове значення ніж при іншому, можна побудувати криві міцності (рис. 3.3.7.1). На рисунку зображено криві $\sigma_2(\sigma_1)$ при $\tau_{12} = 0$. Також на рисунку зображено дві точки А і В, точка А для критерію Мізеса-Хілла, В для критерія максимальних напружень. Ми можемо побачити, що за критерієм максимальних напружень точка А взагалі немає права на існування, так як за критерієм Мізеса-Хілла, точка В немає права на існування також.

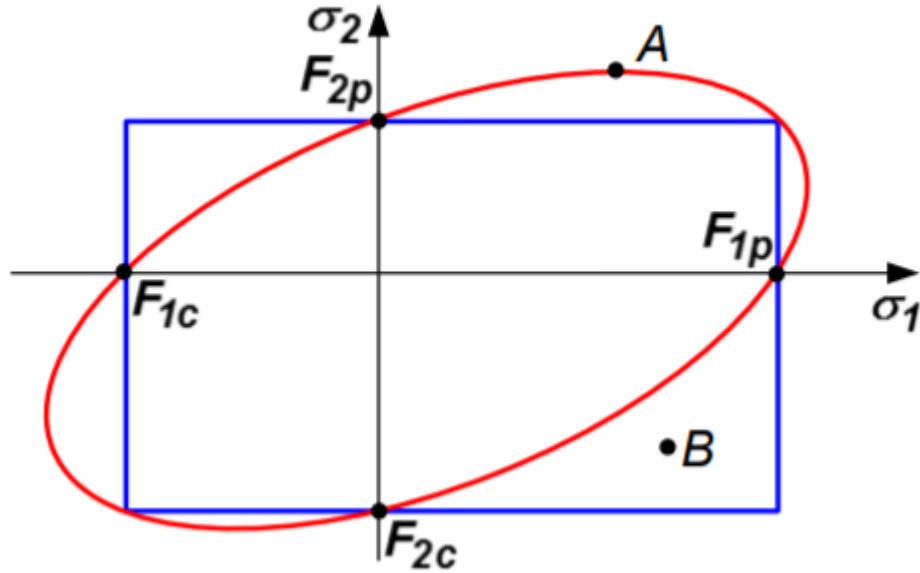


Рис. 3.3.7.1. Зображення двох кривих за критеріями Мізеса-Хілла та критерія максимальних напружень

Для визначення структури композиційного матеріалу нам необхідно знайти параметри, які забезпечують мінімальну вагу цільової функції (маси) параметри n , δ_i , φ_i .

$$G = \sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i \quad (3.3.7.1)$$

Обмежуємо в міцності :

$$\begin{aligned} F_{1ci} &\leq \sigma_{1i} \leq F_{1pi} \\ F_{2ci} &\leq \sigma_{2i} \leq F_{2pi} \\ \tau_{12i} &\leq F_{12i} \end{aligned} \quad (3.3.7.2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1i} &= \vec{E}_{1i} [\varepsilon_x (\cos^2 \varphi_i + \mu_{21i} \sin^2 \varphi_i) + \varepsilon_y (\sin^2 \varphi_i + \mu_{21i} \cos^2 \varphi_i) + \gamma_{xy} (1 - \mu_{21i}) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] \\ \sigma_{2i} &= \vec{E}_{2i} [\varepsilon_x (\sin^2 \varphi_i + \mu_{12i} \cos^2 \varphi_i) + \varepsilon_y (\cos^2 \varphi_i + \mu_{12i} \sin^2 \varphi_i) + \gamma_{xy} (\mu_{12i} - 1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] \end{aligned} \quad (3.3.7.3)$$

За умови використання одного матеріалу на всіх слоях формули (3.3.7.1) - (3.3.7.3) перетворюються в :

$$G = \rho \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3.3.7.4)$$

$$\begin{aligned}
F_{1c} &\leq \sigma_{1i} \leq F_{1p} \\
F_{2c} &\leq \sigma_{2i} \leq F_{2p} \\
\tau_{12i} &\leq F_{12}
\end{aligned}
\tag{3.3.7.5}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{1i} = \vec{E}_1 [&\varepsilon_x (\cos^2 \varphi_i + \mu_{21} \sin^2 \varphi_i) + \varepsilon_y (\sin^2 \varphi_i \\
&+ \mu_{21} \cos^2 \varphi_i) + \gamma_{xy} (1 - \mu_{21}) \sin \varphi_i \cos \varphi_i]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{2i} = \vec{E}_2 [&\varepsilon_x (\sin^2 \varphi_i + \mu_{12} \cos^2 \varphi_i) + \varepsilon_y (\cos^2 \varphi_i + \mu_{12} \sin^2 \varphi_i) + \\
&\gamma_{xy} (\mu_{12} - 1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i]
\end{aligned}$$

$$\tau_{12i} = G_{12} [(\varepsilon_y - \varepsilon_x) \sin 2\varphi_i + \gamma_{xy} \cos 2\varphi_i]
\tag{3.3.7.6}$$

При конструюванні структури композиційних матеріалів за критерієм Мізеса-Хілла використовується ще одна умова для рівносілних слоїв. Суть її полягає в тому, що всі слої мають зруйнуватися одночасно.

Такої умови для критерія максимальних напружень використати ми не можемо. Це пов'язано з тим, що при використанні даного критерія необхідним є дотримання трьох вимог міцності (3.3.7.5). Умовами є недопущення руйнування вздовж волокон, поперек волокон і на зсув в площині слоя композиційного матеріалу.

Нехай від прикладеного навантаження до композиційного матеріалу настало руйнування вздовж і поперек волокон одночасно.

$$\sigma_1 - F_{1p} = \sigma_2 - F_{2p}
\tag{3.3.7.7}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x (\cos^2 \varphi + \mu_{21i} \sin^2 \varphi) - \varepsilon_x (\sin^2 \varphi + \mu_{12i} \cos^2 \varphi) + \varepsilon_y (\sin^2 \varphi + \\
\mu_{21} \cos^2 \varphi - \varepsilon_y (\cos^2 \varphi + \mu_{12} \sin^2 \varphi) + \gamma_{xy} (1 - \mu_{21}) \sin \varphi \cos \varphi - \\
\gamma_{xy} (\mu_{12} - 1) \sin \varphi \cos \varphi = \frac{F_{1p}}{\vec{E}_1} - \frac{F_{2p}}{\vec{E}_2}
\end{aligned}
\tag{3.3.7.8}$$

Можемо побачити, що це можливо при дотриманні певних умов. А саме збереження жорсткого відношення між структурними параметрами конструкційного матеріалу, діючими зусиллями та фізико-механічними характеристиками.

Можна зробити висновок, що введена умова є справедливою тільки за умови завчасно заданих слоїв де одночасно пройде руйнування та в яких напрямках.

Підставимо формулу (6.6) в формулу (6.5):

$$\Phi_{1i} = \varepsilon_x(\cos^2 \varphi_i + \mu_{21} \sin^2 \varphi_i) + \varepsilon_y(\sin^2 \varphi_i + \mu_{21} \cos^2 \varphi_i) + \gamma_{xy}(1 - \mu_{21})\sin\varphi_i\cos\varphi_i - e_1 \leq 0$$

$$\Phi_{2i} = \varepsilon_x(\sin^2 \varphi_i + \mu_{12} \cos^2 \varphi_i) + \varepsilon_y(\cos^2 \varphi_i + \mu_{12} \sin^2 \varphi_i) + \gamma_{xy}(\mu_{12} - 1)\sin\varphi_i\cos\varphi_i - e_1 \leq 0$$

$$\Phi_{12i} = (\varepsilon_y - \varepsilon_x)\sin 2\varphi_i + \gamma_{xy}\cos 2\varphi_i - e_{12} \leq 0 \quad (3.3.7.9)$$

Виведемо граничні деформації при співвісному навантаженні та зсуві:

$$e_1 = \frac{F_1}{E_1}; \quad e_2 = \frac{F_2}{E_2}; \quad e_{12} = \frac{F_{12}}{E_{12}}; \quad (3.3.7.10)$$

Нехай пакет складається із нескінченної кількості слоїв $n \rightarrow \infty$, щоб так, як і при використанні критерія Мізеса-Хілла, виразити запис без індексу «i».

$$\Phi_1 = \varepsilon_x(\cos^2 \varphi + \mu_{21} \sin^2 \varphi) + \varepsilon_y(\sin^2 \varphi + \mu_{21} \cos^2 \varphi) + \gamma_{xy}(1 - \mu_{21})\sin\varphi\cos\varphi - e_1 \leq 0$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = \varepsilon_x(\sin^2 \varphi + \mu_{12} \cos^2 \varphi) + \varepsilon_y(\cos^2 \varphi + \mu_{12} \sin^2 \varphi) + \gamma_{xy}(\mu_{12} - 1)\sin\varphi\cos\varphi - e_1 \\ \leq 0 \end{aligned} \quad (3.3.7.11)$$

Находимо екстремуми використовуючи апарат математичного аналізу в формулі (6.11):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} &= (1 - \mu_{21})[(\varepsilon_y - \varepsilon_x)\sin 2\varphi + \gamma_{xy}\cos 2\varphi] = 0 \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial \varphi} &= (1 - \mu_{12})[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)\sin 2\varphi - \gamma_{xy}\cos 2\varphi] = 0 \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial \varphi} &= 2[(\varepsilon_y - \varepsilon_x)\cos 2\varphi + \gamma_{xy}\sin 2\varphi] = 0 \end{aligned} \quad (3.3.7.12)$$

Отримали один розв'язок для перших двох рівнянь:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_y - \varepsilon_x} \quad (3.3.7.13)$$

В третьому рівнянні функція Φ_{12} має екстремум у випадку:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{\gamma_{xy}} \text{ або } \operatorname{ctg} 2\varphi = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_y - \varepsilon_x} \quad (6.14)$$

Похідні функцій Φ_1 та Φ_2 із врахуванням залежностей (6.12) відрізняються знаками. Графіки даних функцій наведено на рисунку 6.2.

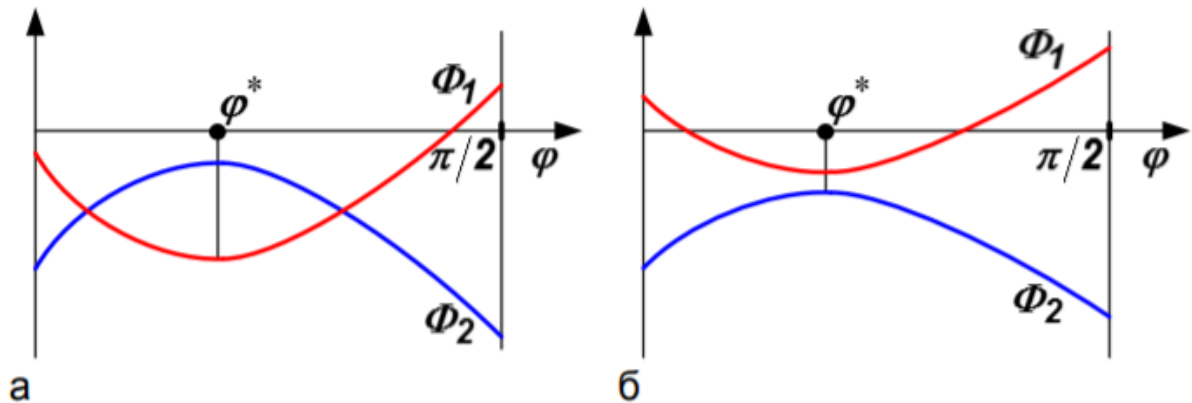


Рис. 3.3.7.2. Графіки функцій Φ_1 та Φ_2

Із формули (3.3.7.8) можна знайти точки перетину кривих Φ_1 та Φ_2 . Координата φ^* екстремумів функцій однакова (рис. 3.3.7.2) та формула (3.3.7.13). Аргументи мінімумів та максимумів в графіків однакові. Також напрямок віток графіків спрямований в одну сторону, що істотно спрощує нашу роботу.

Продовжуємо пошуку мінімальної маси використовуючи критерій Мізеса-Хілла та обмежившись по міцності. Графік функції $\Phi_{пр}$ проходить над віссю φ , перетинаючи її в одному чи двох місцях (рис. 3.3.7.2). Тому піднімаємо над віссю φ графік функції. При цьому в композиційному матеріалі мають залишитися слої із запасом міцності (рис. 3.3.7.4).

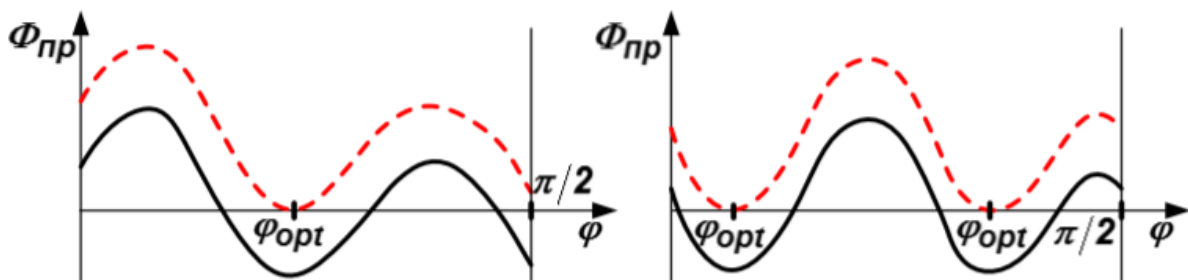


Рис.3.3.7.4. Пошук оптимальної структури композиційного матеріалу

Обмеження допустимих значень формує верхня огинаюча крива трьох функцій (3.3.7.11), відповідно до критерія максимальних напружень.

Враховуючи базу критерія максимальних напружень, на практиці не завжди верхня огинаюча крива є гладкою плавною кривою. Це і є для нас принципіальною відмінністю по критерію максимальних напружень. Дане явище стає для нас проблемою, адже не завжди від такої кривої можна взяти похідну (продиференціювати).

Розглянемо інші можливі варіанти розв'язку. По умовах міцності верхня огинаюча крива зображена на рисунку 3.3.7.5 ілюстрації а-г. Оптимальними структурами будуть $[0/90]$, $[\pm\varphi]$, $[0][90]$.

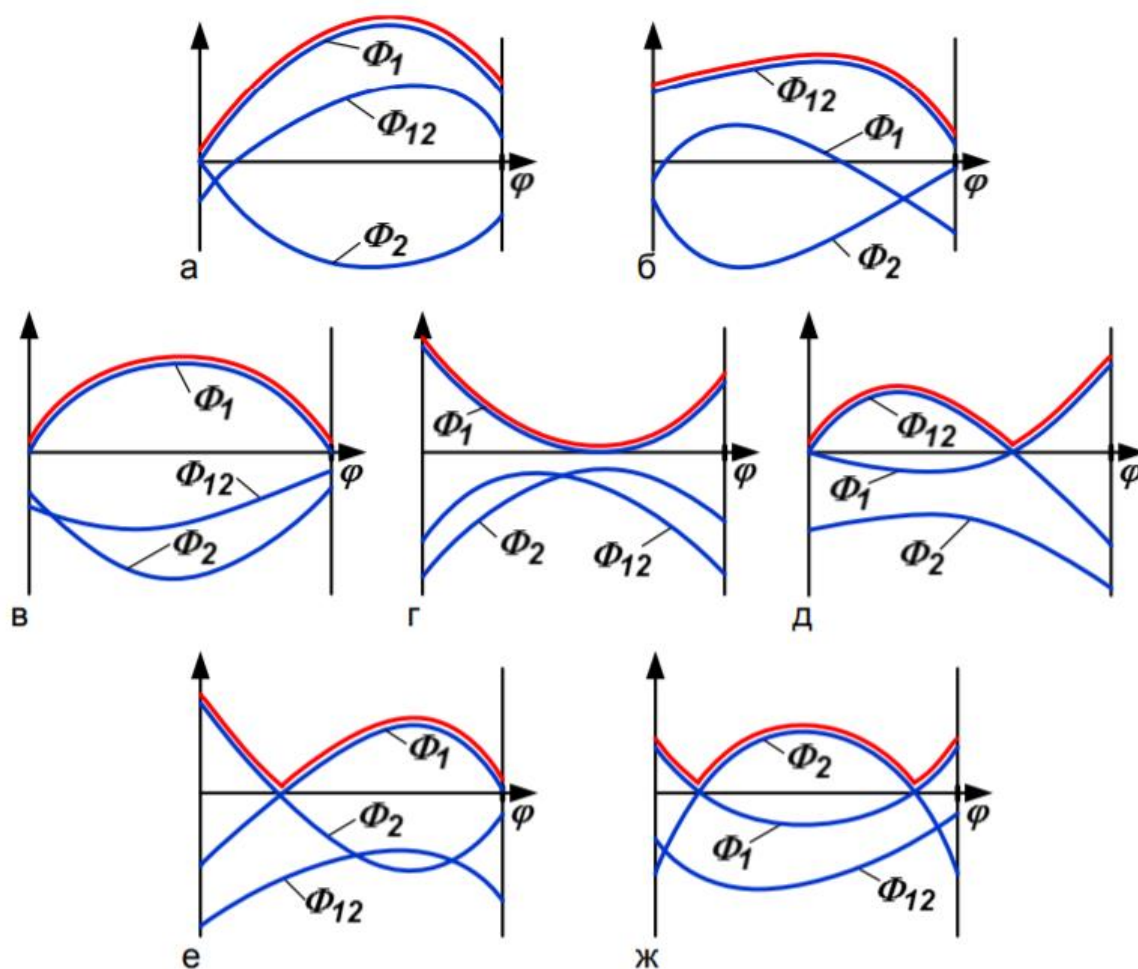


Рисунок 3.3.7.5. Різноманітні типи оптимальних структур композиційного матеріалу по критерію максимальних напружень

Спроби створити огинаючу криву, що відповідає більш кładнішим структурам композиційних матеріалів, не витримували перевірку рівнянням (3.3.7.11). Як висновок, по критерію максимальних напружень із обмеженнями по міцності ми отримали таку ж структуру як і при критерії Мізеса-Хілла, а саме структура $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$. Зрівнявши математичні записи інших критеріїв міцності маємо висновок, що незалежно від використаного критерію для підрахунків, найоптимальнішим варіантом структури є $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$. Залежно від критерія міцності варіюється товщина слоїв пакета та кутів армування, але оптимальна структура не змінюється. Це значно спрощує для інженерів процес оптимізації структури.

3.3.8 Проектування структури композита при умові декількох схем прикладення навантаження

Кожен проєктований елемент працює в різноманітних умовах роботи. В залежності від умов експлуатації на елемент діють різні по характеру та величинах навантаження. Не дивлячись на складність умов роботи для елемента, він в будь-якому випадку має витримати прикладені до нього навантаження.

Сучасна авіація є одним із наймасштабнішим споживачів композиційних матеріалів. Це обумовлено тим, що конструкція авіасудна має витримувати досить великі навантаження під час його маневрів, мінімалізуючи свою вагу. Адже при збільшенні ваги, для підйому авіаконструкції в повітря, необхідно прикладати величезне зусилля тяги та підйомної сили, що призводить до наступної проблеми — проєктування наддвигунів, які зможуть виконати цю роботу. Тому для прикладу ми розглянемо крило літака, адже крила це одні із найнавантажениших елементів літака при польоті та маневрах (рис. 3.3.8.1).

При зльоті та посадці на консольну балку діють змінні навантаження. Але конструкційні параметри балки літака мають бути незмінними. Умова міцності має виконуватися по всій балці, і в точці А, точці В і точці С (рис. 3.3.8.2).

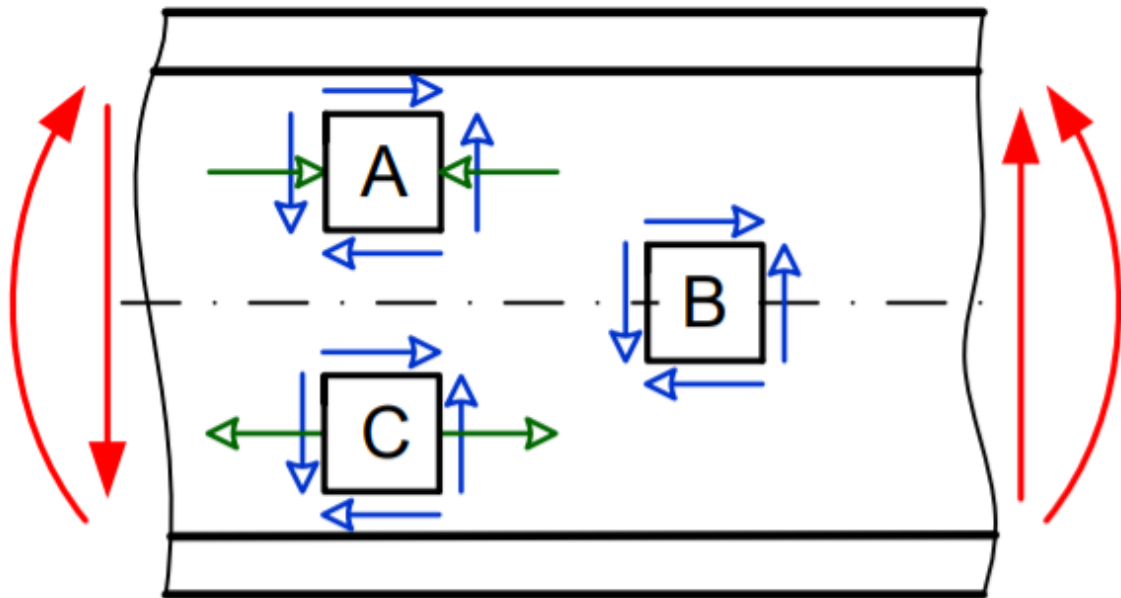
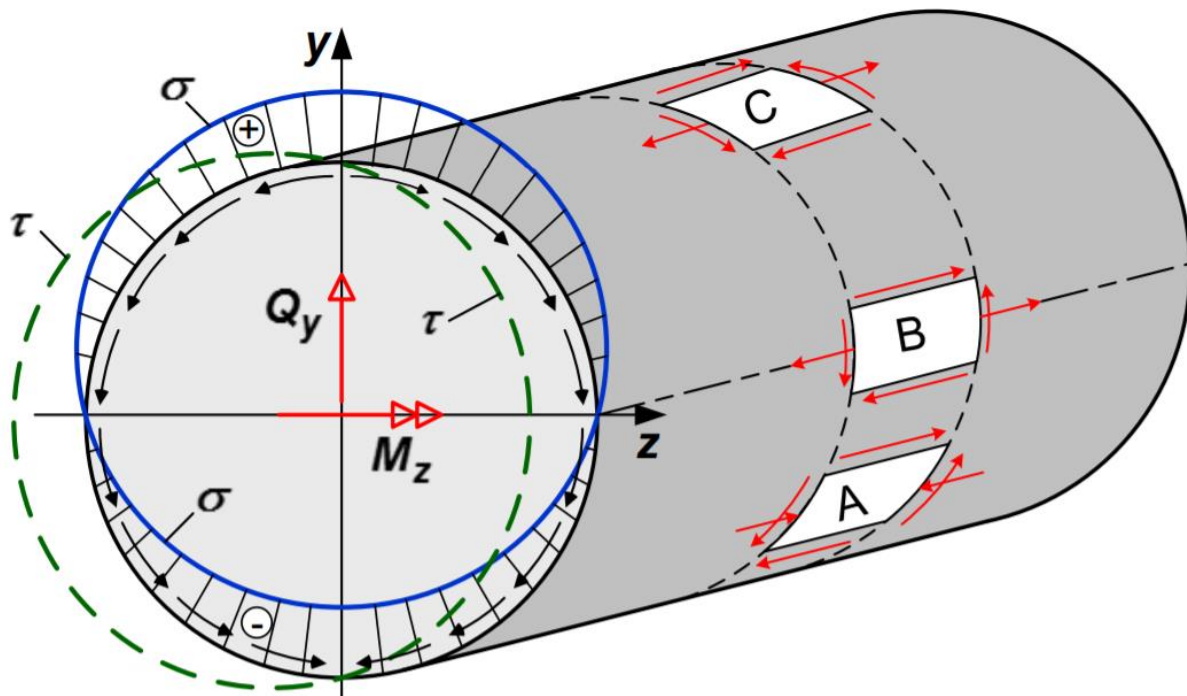


Рис. 3.3.8.2. Зображення навантажень, що діють на балку крила літака

Розглянемо навантаження, що діють на циліндричний корпус під час її запуску та польоту. Оскільки такий корпус має циліндричну форму, то доцільним є виготовлення її методом намотки. Під час намотки можна контролювати стабільну товщину стінки корпусу і структуру композиційного матеріалу. Прикладаємо навантаження на циліндричний корпус. В різний проміжок часу він сприйматиме різне навантаження. Ці перехідні навантаження діють так, що корпус то надувається, то спускається. В цей час волокна композиту сприймають навантаження на стиск-розтяг. Але варто пам'ятати, що в початкові секунди зльоту, коли відсутні аеродинамічні сили, корпус також сприймає і поперечні навантаження. У деяких випадках перевантаження при старті сягає 100 G. Також циліндричний корпус сприймає і згинаючі та крутні моменти від аеродинамічних сил.



*Рис. 3.3.8.3. Зображення навантажень, що сприймаються
циліндричним корпусом*

Враховуючи ізотропію металевих виробів, несучу здатність на порядок легше оцінити. А от несуча здатність композиційних матеріалів залежить від структури даного композиційного матеріалу. Більше того, дана структура має забезпечити мінімальну вагу виробу не зменшуючи міцності.

Нехай в точці В оптимальною структурою буде структура з наступним напрямком волокон $[\pm 45]$, а для точки А чи С – $[0]$. Але як же підібрати найбільш коректну структуру для корпусу вцілому? Для структур $[0]$ і $[\pm 45]$ можна підібрати товщину, яка забезпечить умову міцності в кожній точці, але слід врахувати, що ця структура може бути перевантаженою. Нам необхідно підібрати оптимальну структуру композиційного матеріалу на основі якісних аналізів уже відомих факторів. Брати до уваги будемо три розрахункових випадки:

Розрахункова схема 1: Нехай спроектована структура $[\pm \varphi]$ задовільняє умову міцності, але не задовільняє умову міцності по другому розрахунковому випадку. Відсутній резерв по підвищенню міцності, так як це є оптимальним варіантом структури. Єдиний спосіб підвищити міцність

конструкції, це збільшення товщини. Тоді появиться деякий інтервал $\Delta\varphi$, в межах якого міцність потовщеного пакета забезпечить перший розрахунковий випадок (рис. 3.3.8.4). Твердження вірне як для кута, так і комбінацій з цим кутом в межах інтервалу. Тому він буде корисним для інженерів у багатьох різних задачах.

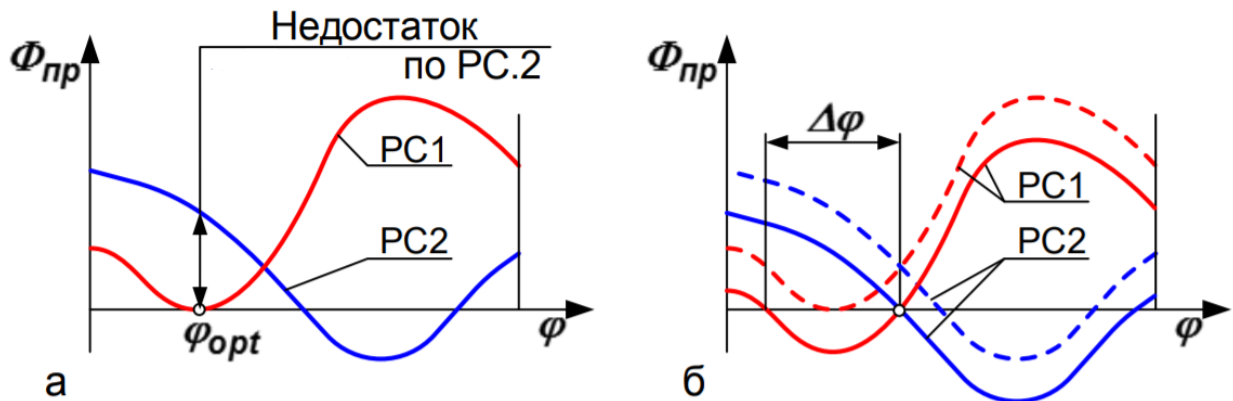


Рис. 3.3.8.4. Зображення забезпечення міцності для двох випадків розрахунків

Розрахункова схема 2: у випадку, коли умова міцності не виконується для якоїсь випадку, необхідно додати слої з кутом армування φ^* , за умови що в крива $\Phi_{пр}(\varphi)$ найменша відстань до вісі φ (рис. 3.3.8.5).

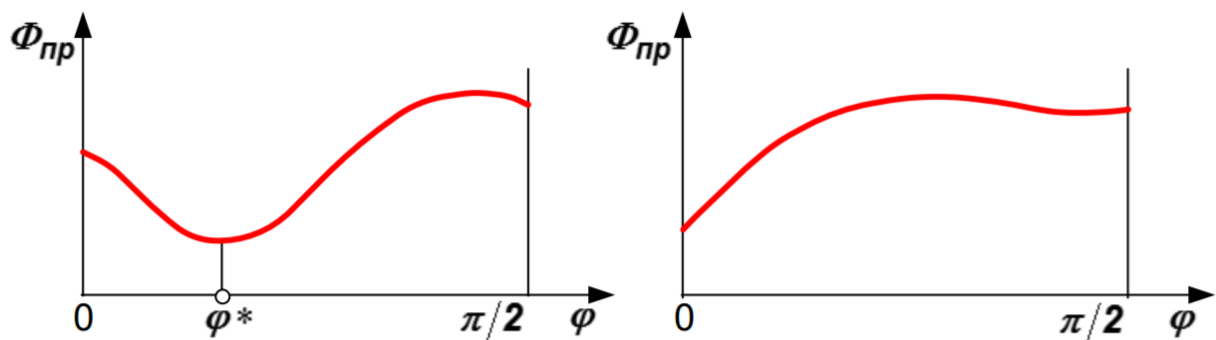


Рис. 3.3.8.5. Вибір оптимальних кутів армування: 1-й випадок для кута φ^* , другий випадок для кута 0°

Розрахункова схема 3: параметричні випробування показали, що структура $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$, при $\varphi_1 \neq 0$ або $\varphi_1 \neq \pi/2$, $\varphi_2 \neq 0$, $\varphi_2 \neq \pi/2$ реалізується досить рідко. Досить часто оптимальними структурами стають $[\pm\varphi]$, $[0/\pm\varphi]$, $[90/\pm\varphi]$.

Дізнаємося тип шуканої структури. За критерієм Мізеса-Хілла можна побачити, що у випадку декількох навантажень, структуру варто шукати в класах $[\pm\varphi/\pm\varphi]$ або $[0/90/\pm\varphi]$.

Практика конструювання літаків з конструкційних матеріалів говорить про зазвичай прийняту структуру $[0/90/\pm\varphi]$, досить часто використовують $\varphi = \pi/4$, а саме досить популярною структурою є $[0/90/\pm 45]$. Дана структура підібрана інженерами більш інтуїтивно, який відповідає диференціальному принципу проектування.

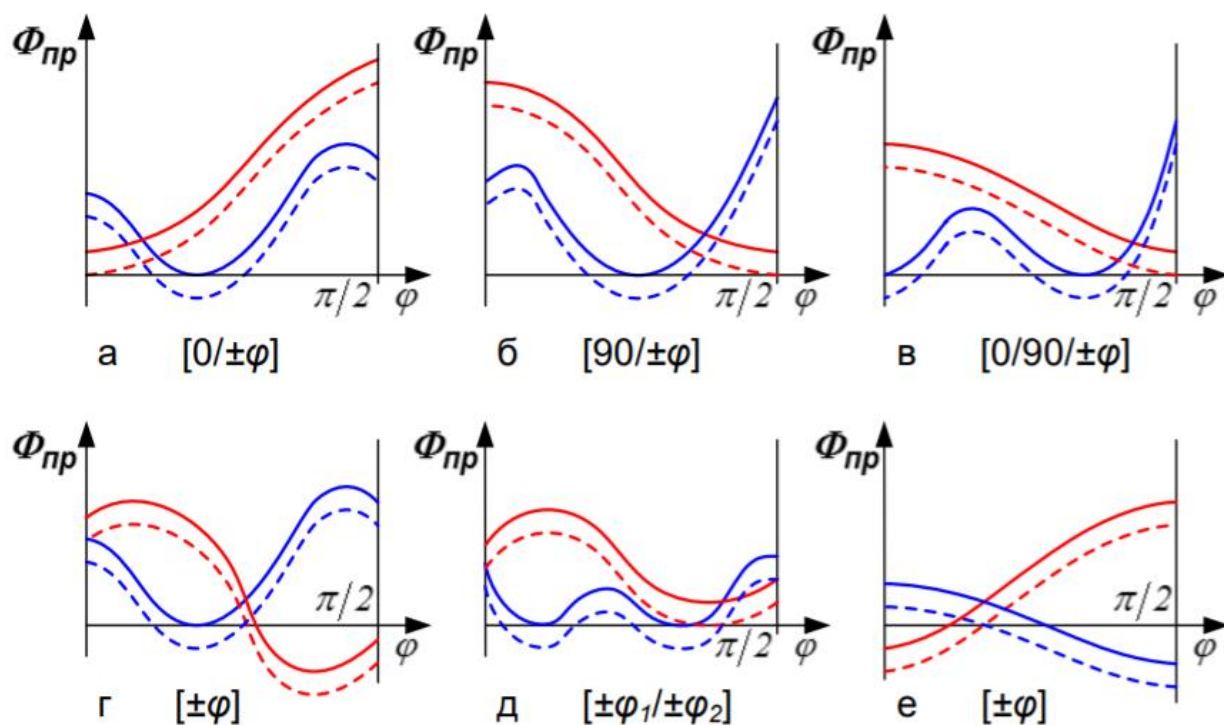


Рис. 3.3.8.6 Варіанти типів оптимальних структур

Саме така структура композиційних матеріалів найкраще сприймає навантаження N_x, N_y, q_{xy} .

$$\delta_0 = \frac{N_x}{F_1}; \delta_{90} = \frac{N_y}{F_1}; \delta_{45} = \frac{q_{xy}}{F_{45}} \quad (3.3.8.1)$$

Розрахунки за формулою (3.3.8.1) не враховують одного із фундаментальних принципів механіки, тіла, що деформується – сумісності деформації слоїв. Це часто приводило до втрати монолітності композиційного матеріалу. Це пов'язано з тим, що гранична деформація вздовж волокна є на порядок більшою ніж поперек (рис. 3.3.8.7). При

розтягу композитного матеріалу граничний стан слою з армуванням 90° наступить раніше ніж в слою 0° .

Розглянутий вище метод побудований на інтегральному принципі проектування. Відповідно до принципу кожен слой сприймає прикладене навантаження.

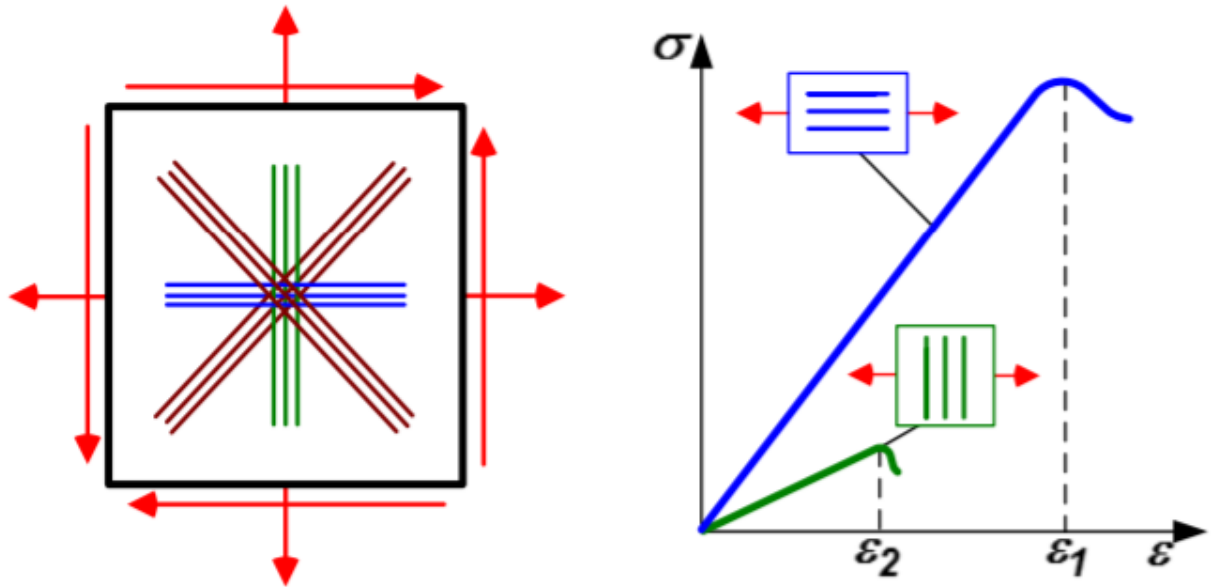


Рис. 3.3.8.7 Характерні діаграми деформування композиційних матеріалів

1. Структура $[\pm\varphi_1/\pm\varphi_2]$. Де B_{11} , B_{12} , B_{22} , B_{33} коефіцієнти жорсткості.

Визначимо деформацію пакета:

$$\varepsilon_{xk} = \frac{N_{xk}B_{22} - N_{yk}B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} = \frac{1}{\delta} A_{xk}; \quad \varepsilon_{yk} = \frac{N_{yk}B_{11} - N_{xk}B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} = \frac{1}{\delta} A_{yk}; \quad \gamma_{xyk} = \frac{q_{xyk}}{B_{33}} A_{xyk} \quad (3.3.8.2)$$

Визначаємо напруження в місцевій системі координат в слоях композиційних матеріалах:

$$\sigma_{1ik} = \frac{\vec{E}_1}{\delta} [A_{xk}(\cos^2 \varphi_i + \mu_{21} \sin^2 \varphi_i) + A_{yk}(\sin^2 \varphi_i + \mu_{21} \cos^2 \varphi_i) + A_{xyk}(1 - \mu_{21})\sin\varphi_i\cos\varphi_i] = \frac{A_{1ik}}{\delta}$$

$$\sigma_{2ik} = \frac{\vec{E}_2}{\delta} [A_{xk}(\sin^2 \varphi_i + \mu_{12} \cos^2 \varphi_i) + A_{yk}(\cos^2 \varphi_i + \mu_{12} \sin^2 \varphi_i) + A_{xyk}(\mu_{12i} - 1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i] = \frac{A_{2ik}}{\delta} \quad (3.3.8.3)$$

$$\tau_{12ik} = \frac{G_{12}}{\delta} [(A_{yk} - A_{xk}) \sin 2\varphi_i + A_{xyk} \cos 2\varphi_i] = \frac{A_{12ik}}{\delta}$$

Із врахуванням критерія міцності Мізеса-Хілла записуємо в наступному вигляді:

$$\frac{A_{1ik}^2}{\delta^2 F_{1ik}^2} - \frac{A_{1ik} A_{2ik}}{\delta^2 F_{1ik} F_{2ik}} + \frac{A_{2ik}^2}{\delta^2 F_{2ik}^2} + \frac{A_{12ik}^2}{\delta^2 F_{12ik}^2} \leq 1, i = 1, \dots, 4 \quad (3.3.8.4)$$

М – парні

$$F_{1ik} = \begin{cases} F_{1p} & \text{при } A_{1ik} \geq 0 \\ F_{1c} & \text{при } A_{1ik} < 0 \end{cases} \quad F_{2ik} = \begin{cases} F_{2p} & \text{при } A_{2ik} \geq 0 \\ F_{2c} & \text{при } A_{2ik} < 0 \end{cases} \quad F_{12i} = F_{12} \quad (3.3.8.5)$$

Визначаємо мінімальну товщину слоя пакета:

$$\delta = \max_{i,k} \sqrt{\frac{A_{1ik}^2}{F_{1ik}^2} - \frac{A_{1ik} A_{2ik}}{F_{1ik} F_{2ik}} + \frac{A_{2ik}^2}{F_{2ik}^2} + \frac{A_{12ik}^2}{F_{12ik}^2}} \quad (3.3.8.6)$$

Якщо ми використовуємо обмеження по міцності використовуючи критерій максимальних напружень то визначимо товщину:

$$\delta = \max_{i,k} \left(\frac{|A_{1ik}|}{F_{1ik}}, \frac{|A_{2ik}|}{F_{2ik}}, \frac{|A_{12ik}|}{F_{12ik}} \right) \quad (3.3.8.7)$$

Таким чином можна визначити значення параметрів Ψ , φ_1 , φ_2 , при мінімальній товщині.

2. Структура $[0/90/\pm\varphi]$

Знайдемо товщину слоїв $\delta_1 (\varphi_1 = 0)$, $\delta_2 (\varphi_2 = \pi/2)$, $\delta_3 = \delta_4 = \delta (\varphi = \pm\varphi)$ та кут φ .

$$\delta_1 = \psi_1 \delta_\Sigma; \delta_2 = \psi_2 \delta_\Sigma; 2\delta_3 = 2\delta_4 = (1 - \psi_1 - \psi_2) \delta_\Sigma \quad (3.3.8.8)$$

Записуємо наступні формули для коефіцієнтів жорсткості:

$$B_{11} = \delta_\Sigma [\psi_1 \vec{E}_1 + \psi_2 \vec{E}_2 + (1 - \psi_1 - \psi_2) (\vec{E}_1 \cos^4 \varphi + \vec{E}_2 \sin^4 \varphi + 2\vec{E}_1 \mu_{21} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \sin^2 2\varphi)]$$

$$B_{22} = \delta_{\Sigma} [\psi_1 \vec{E}_2 + \psi_2 \vec{E}_2 + (1 - \psi_1 - \psi_2)(\vec{E}_1 \sin^4 \varphi + \vec{E}_2 \cos^4 \varphi + 2\vec{E}_1 \mu_{21} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \sin^2 2\varphi)] \quad (3.3.8.9)$$

$$B_{12} = \delta [(\psi_1 + \psi_2)(E_1 + E_2) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \vec{E}_1 \mu_{21} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) - G_{12} \sin^2 2\varphi]$$

$$B_{33} = \delta [(\psi_1 + \psi_2)G_{12} + (1 - \psi_1 - \psi_2)[(\vec{E}_1 + \vec{E}_2 - 2\vec{E}_1 \mu_{21}) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \cos^2 2\varphi]$$

Підставляємо дані залежності в (3.3.8.2) можемо визначити деформації пакета.

Таким чином, запропонована нова методика проектування композиційного матеріалу в точці з урахуванням мінімізації ваги при забезпеченні міцності.

Висновки: композиційні матеріали володіють унікальними фізико-механічними властивостями. При високій міцності, мають невелику вагу. Якщо порівнювати із сталлю, то міцність композиційного матеріала вища ніж в сталі, а маса в чотири рази менша. Тому проектування нової рами роботизованого комплексу спеціального призначення виконуватиметься із композиційного матеріалу.

Виходячи із забезпеченості лабораторії, для виготовлення композиційної рами використовується напівфабрикат препрег Style 7781 (E-glass) структури $[0/90/\pm 45/0/90/\pm 45/\pm 45/90/0/\pm 45/90/0]$ (16 слоїв).

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ТА ОПИС ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПІДБРАНИХ РІШЕНЬ

4.1 Проведення підбору профіля поперечного перерізу об'єкта вдосконалення

Оптимізація рами пов'язана із модернізацією мобільного робота спеціального призначення, а саме створення нового механізму переміщення. Нова версія робота матиме поліпшений механізм пересування, який працюватиме по принципу паралельної кінематики.

Механіка рухів ланок новітньої версії крокуючого механізму, напряму залежить від кількості крокуючих ланок та способу їх кріплення.

Реалізація руху роботомеханічного комплексу буде здійснюватися за використання рухомої схеми «гексапод». У конструкції механізму наявні шість рухомих ланок, звідси походить назва гексапод (“hex” — число шість).

Метод кріплення даних шести ланок відіграє важливу роль в проектуванні геометрії рами.

Проведемо підбір геометрії рами роботомеханічного наземного комплексу спеціального призначення за критерієм міцності.

В проектуванні геометрії рами необхідно забезпечити міцність та жорсткість конструкції роботомеханічного комплексу спеціального призначення, адже на раму діє ряд навантажень: вага штанг змінної довжини, схвата маніпулятора та гіроскопічних рамок, сервоприводів на штангах, вага лапок, вага сервоприводів лапок.

Для виготовлення рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення варто врахувати специфіку роботи та проектування із композиційних матеріалів. На основі підбраного матеріалу (препрег Style 7781 E-Glass), підберемо можливі варіанти геометричних параметрів рам, які буде зручно виготовляти із тканинного напівфабрикату.

4.1.1 Розрахунок напружено-деформованого стану циліндричної рами

Варіант рами: циліндрична поверхня (рис. 4.1.1.1).

Одним із найменш габаритних варіантів рами є циліндрична поверхня рами для роботомеханічного комплексу спеціального призначення. Габарити циліндричної рами відповідають габаритам вписаного кола в раму вихідної конструкції. Циліндрична рама надає нам можливість зберегти розміщення установки механізму рухомого схвата маніпулятора роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

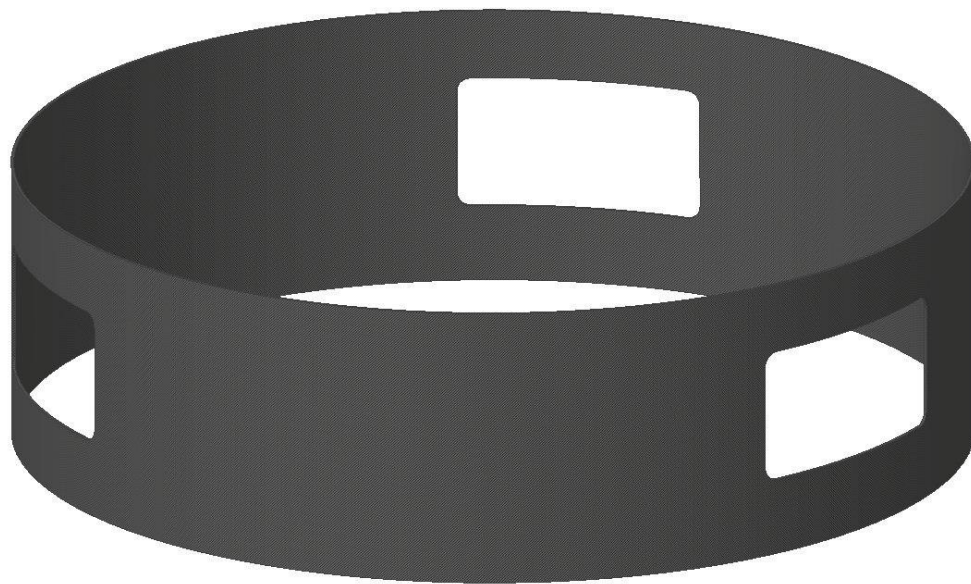


Рис.4.1.1.1. Перший варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення (циліндрична поверхня)

Змоделюємо циліндричну поверхню рами роботомеханічного механізму. Виконаємо отвори для розміщення та кріплень сервоприводів штанг змінних довжин.

Маса циліндричної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення становить 13.120 кг, що майже на 27 кг менше старої рами (рис. 4.1.1.2).

Габарити циліндричної рами становлять:

- Висота 400 мм;
- Діаметр 1361 мм;
- Товщина 8 мм.

Висота та діаметр підібрані для зручності встановлення механізму переміщення схвата маніпулятора. Товщина обумовлена підбором кількості тканинних слоїв препрега.

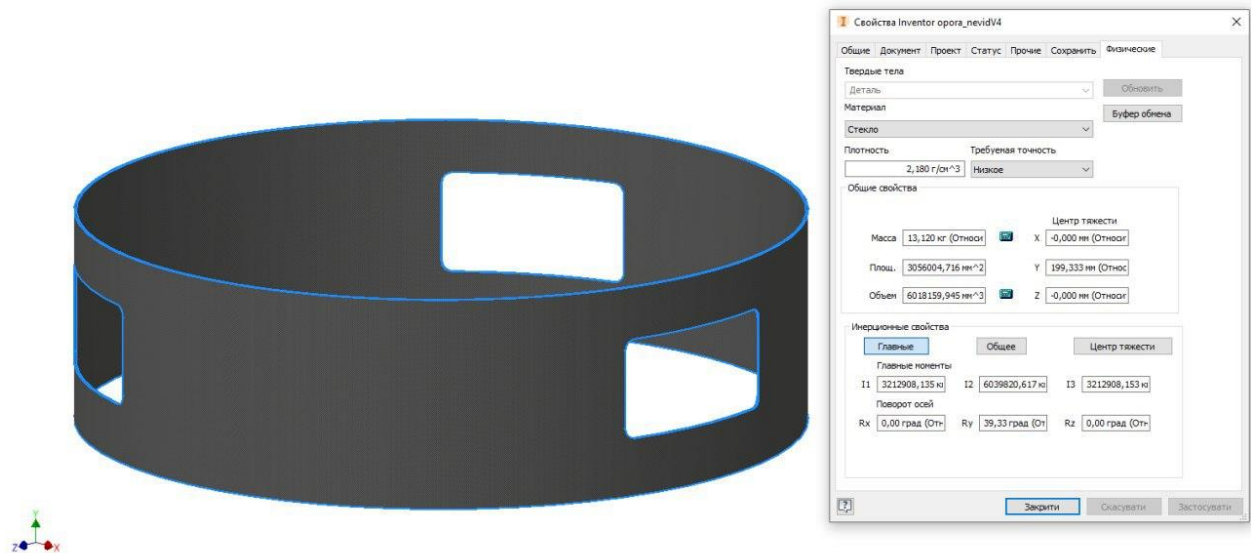
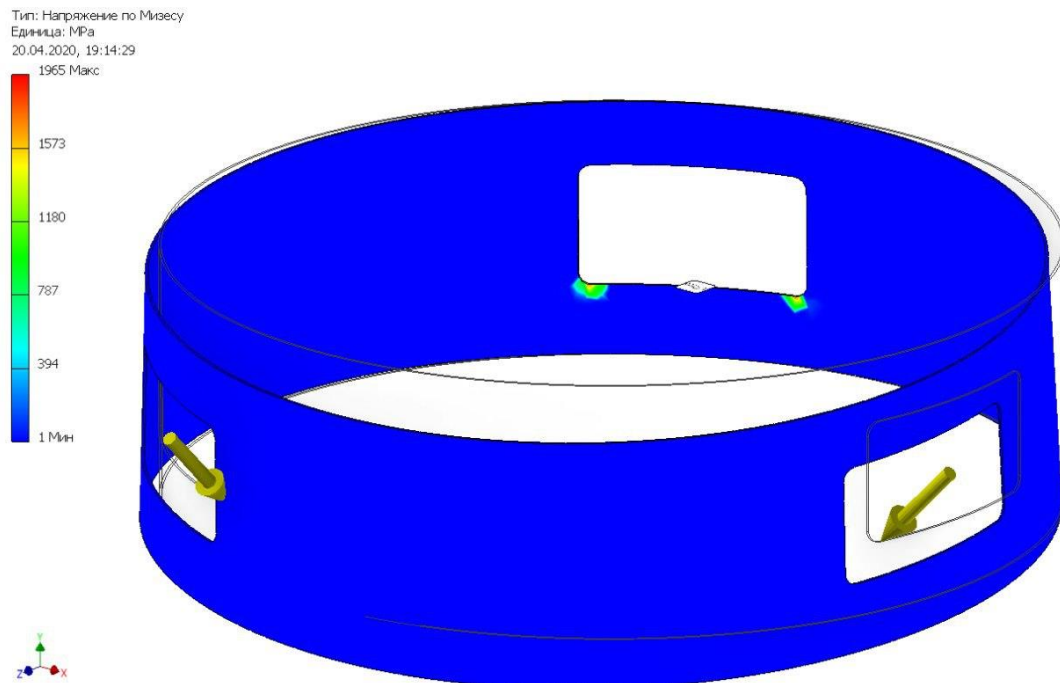


Рис.4.1.1.2. Параметры цилиндрической рамы роботомеханического комплекса специального назначения

Змоделюємо схему прикладення навантаження та проаналізуємо як це навантаження впливає на раму. Сумарне навантаження на раму становить 200 кг.

Навантаження від севопроводів будуть передаватися на раму по напрямку нахилу штанг.

Враховуючи характер прикладення навантажень та відсутність ребер жорсткості, рама змінює свою початкову форму. Прикладені навантаження вигинають раму до форми наближеної до однопорожнинного гіперboloїда (рис.4.1.1.3).



*Рис. 4.1.1.3. Аналіз навантажень циліндричної рами
роботомеханічного комплексу спеціального призначення*

Проаналізуємо коефіцієнт запасу міцності рами після прикладення навантажень (рис. 4.1.1.4). У нашому випадку коефіцієнт запасу міцності, становить набагато менше одиниці, а саме з умови міцності при статичному навантаженні $1.5 > \llcorner 0.16 \llcorner$. Тобто, прикладені навантаження досягають граничних навантажень, які в свою чергу провокують необоротні процеси та можуть призвести до зламу рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

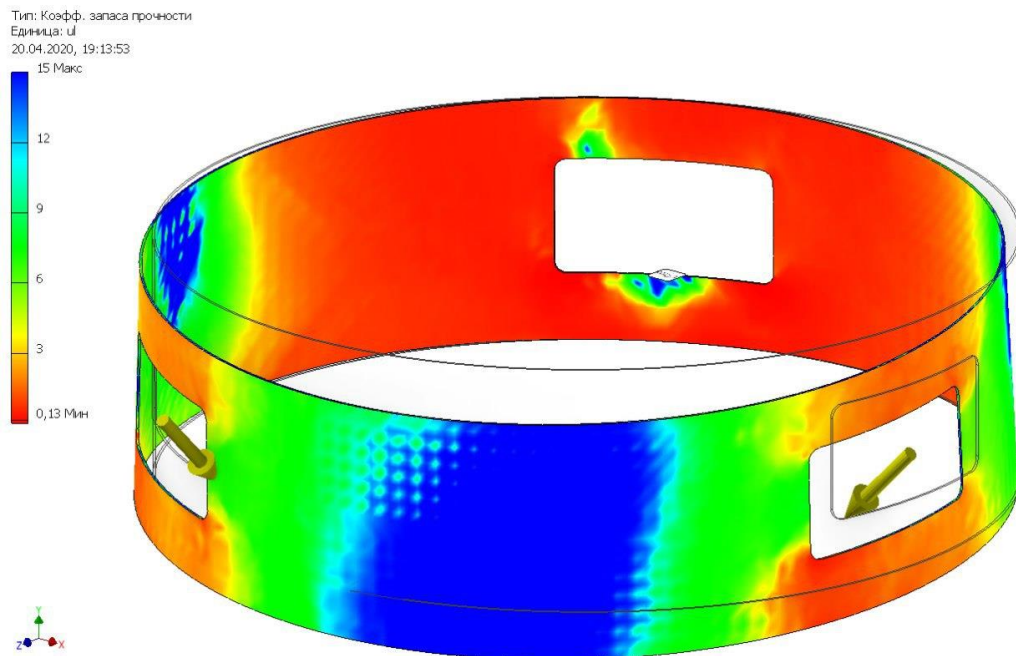


Рис. 4.1.1.4. Результати аналізу циліндричної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення на коефіцієнт міцності

Оскільки не виконується умова міцності при статичному навантаженні

$1.5 > «0.16»$, то прикладені навантаження призводять до руйнування рами (рис. 4.1.1.5).

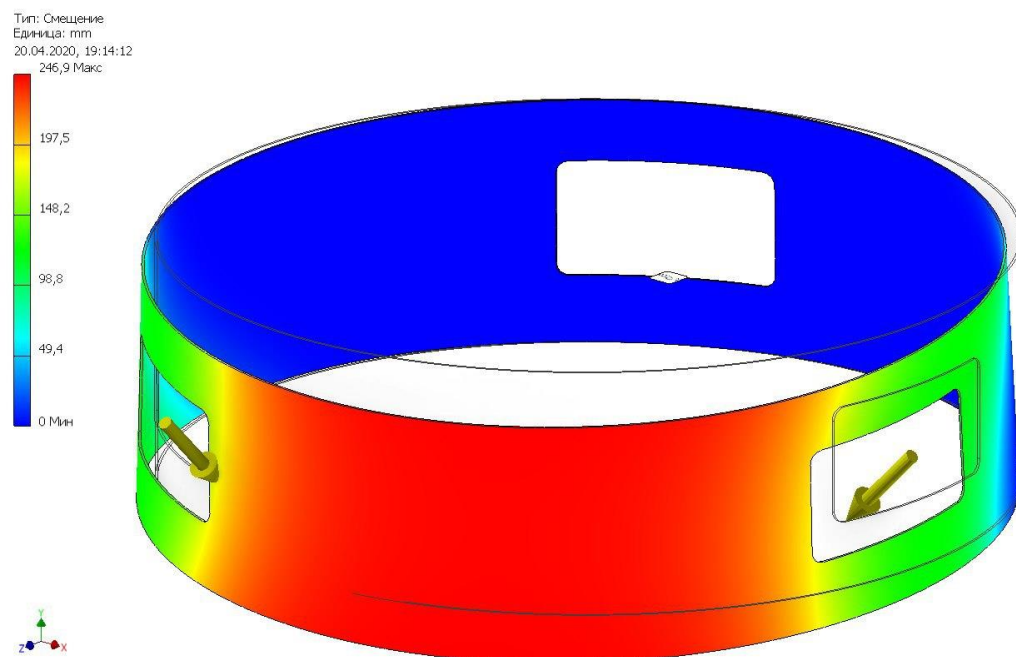


Рис.4.1.1.5. Результати аналізу циліндричної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення на зміщення

Висновок: запропонований варіант циліндричної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення не задовільняє поставлених для неї вимог по міцності та жорсткості.

Розглянемо наступний варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

4.1.2 Розрахунок напружено-деформованого стану пірамідоподібної рами

Варіант рами: пірамідоподібна поверхня (рис. 4.1.2.1).

Наступним варіантом є пірамідоподібна поверхня рами, яка є найзручнішою для використання, адже вона є найбільш подібною по конфігурації вихідного варіанту рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення відносно всіх інших. Ця перевага дає можливість мінімальних змін вихідної конструкції роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Сторони пірамідоподібної рами розміщені під кутом 45° відносно горизонтальної площини. А кути віршин трикутника заокруглені радіусом 400 мм, для знешкодження концентраторів напружень у вигляді граней.

Змоделюємо пірамідоподібну поверхню рами роботомеханічного механізму. Виконаємо отвори для розміщення та кріплень сервоприводів штанг змінних довжин (рис. 4.1.2.1). Процес виготовлення рами пірамідоподібної форми є найбільш зручним.



Рис. 4.1.2.1. Другий варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення (пірамідоподібна поверхня)

Маса пірамідоподібної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення становить 26.068 кг, що майже на 14 кг менше старої рами (рис. 4.1.2.2).

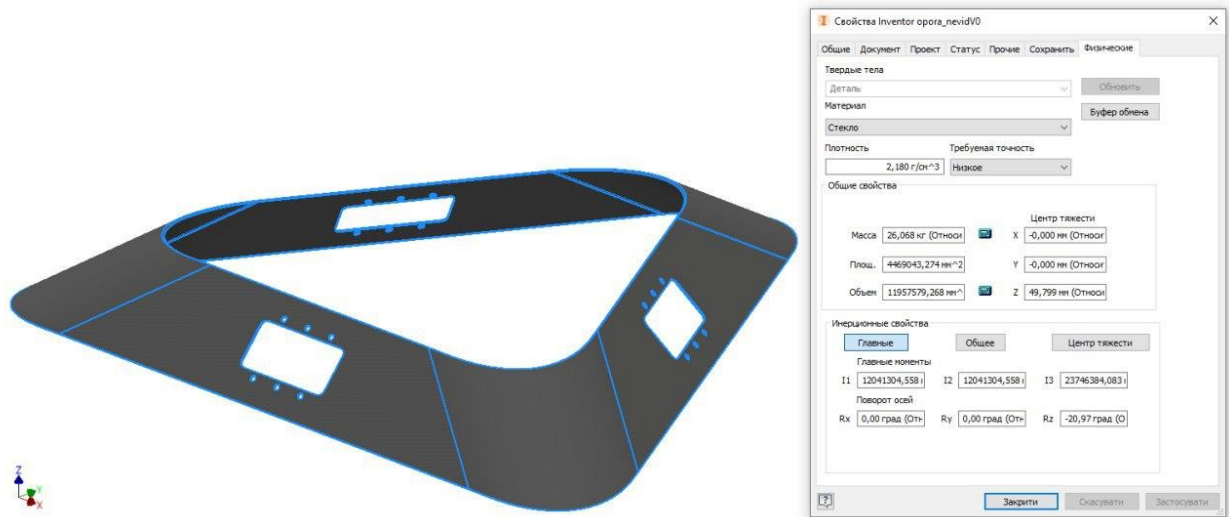


Рис.4.1.2.2. Параметры пирамидоподібної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Змоделюємо схему прикладення навантаження та проаналізуємо як це навантаження впливає на раму. Сумарне навантаження на раму становить 200 кг.

До пірамідоподібному варіанті виконання рами, навантаження від сервоприводів ланок змінної довжини працює на виривання в напрямку руху штанги змінної довжини (рис. 4.1.2.3.). Тобто симуляцію навантаження потрібно прикладати по нормалі до поверхні.

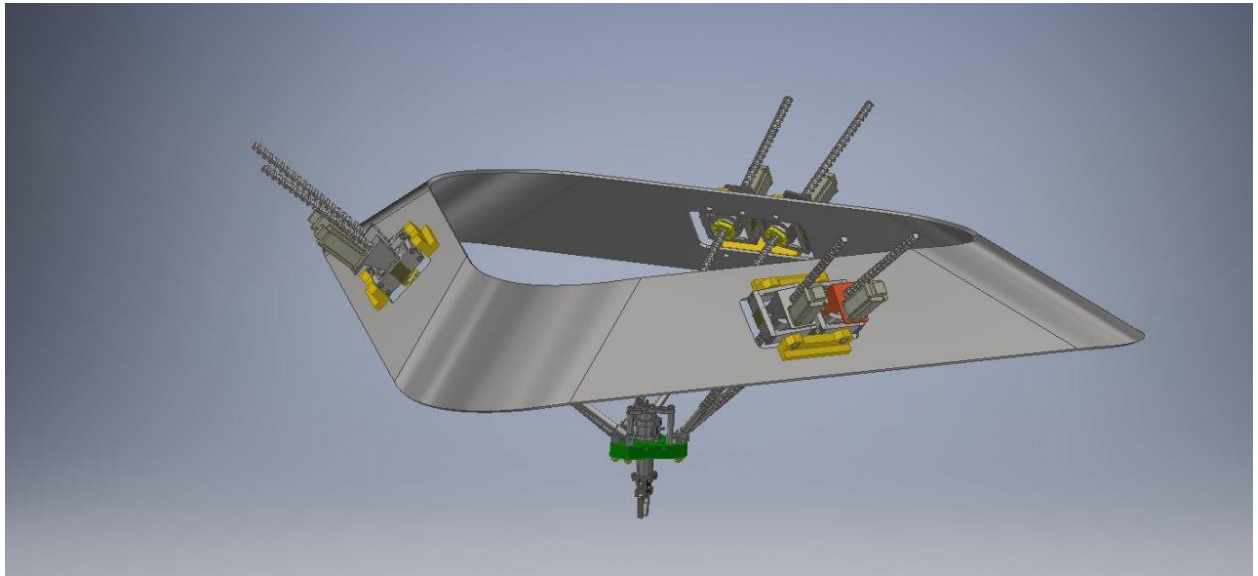


Рис. 4.1.2.3. Модель пірамідоподібної рами та механізму паралельної кінематики

Враховуючи характер прикладення навантажень та відсутність ребер жорсткості, рама змінює свою початкову форму, а саме спостерігається прогин (рис. 4.1.2.4).

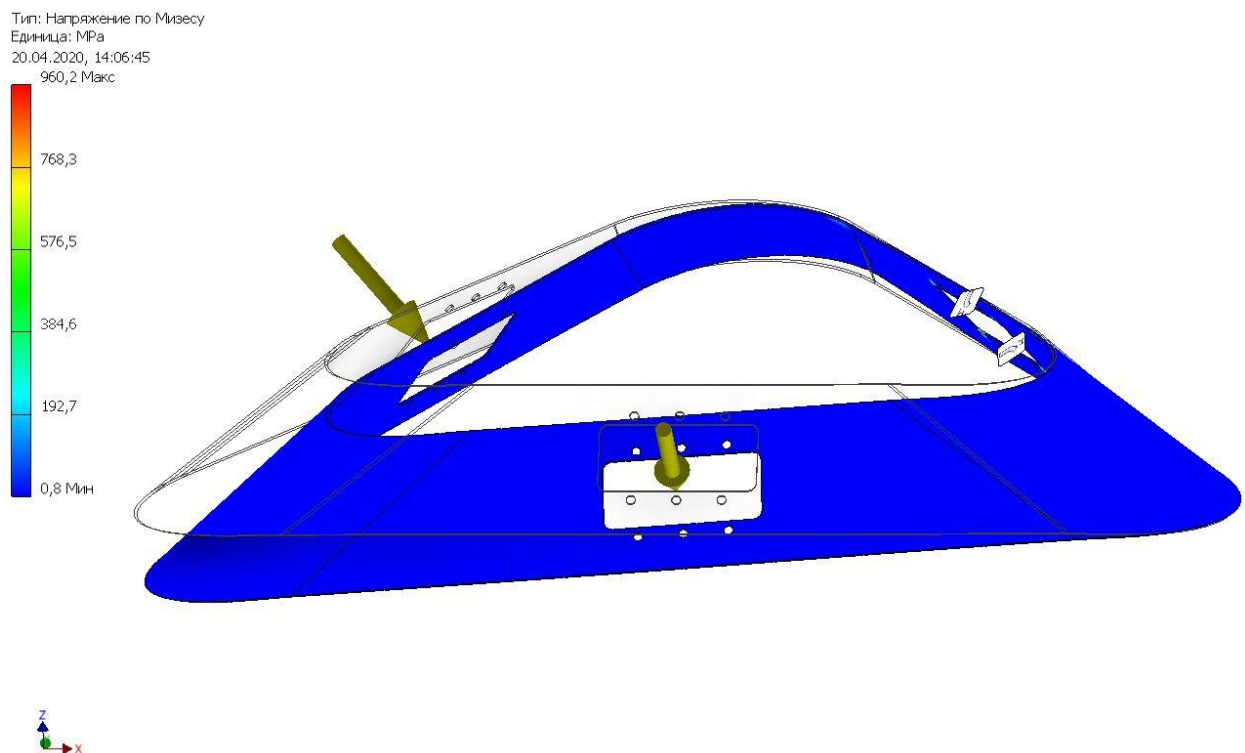


Рис. 4.1.2.4. Аналіз навантажень пірамідоподібної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Проаналізуємо коефіцієнт запасу міцності рами після прикладення навантажень (рис. 4.1.2.5). У нашому випадку коефіцієнт запасу міцності, становить набагато менше одиниці, а саме з умови міцності при статичному навантаженні $1.5 > \llcorner 0.26 \llcorner$. Тобто, прикладені навантаження досягають граничних навантажень, які в свою чергу провокують необоротні процеси та можуть призвести до зламу рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

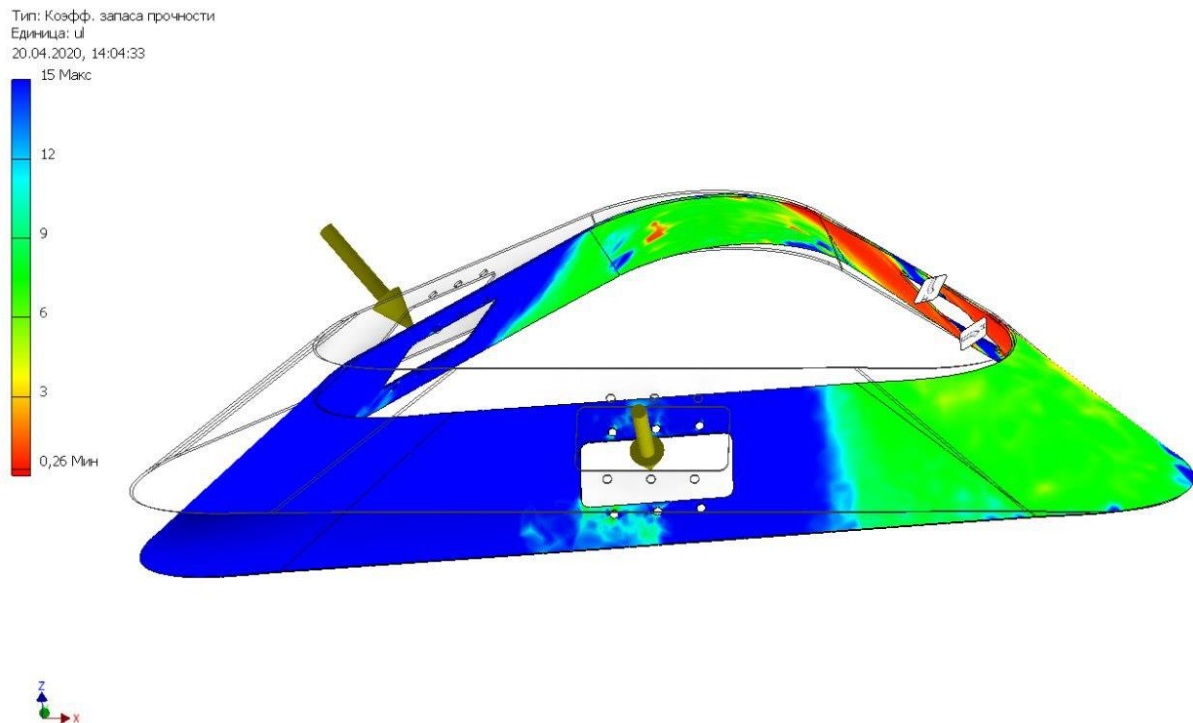


Рис. 4.1.2.5. Результати аналізу пірамідоподібної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення на коефіцієнт міцності

Оскільки не виконується умова міцності при статичному навантаженні $1.5 > \llcorner 0.26 \llcorner$, то прикладені навантаження призводять до руйнування рами (рис. 4.1.2.6.).

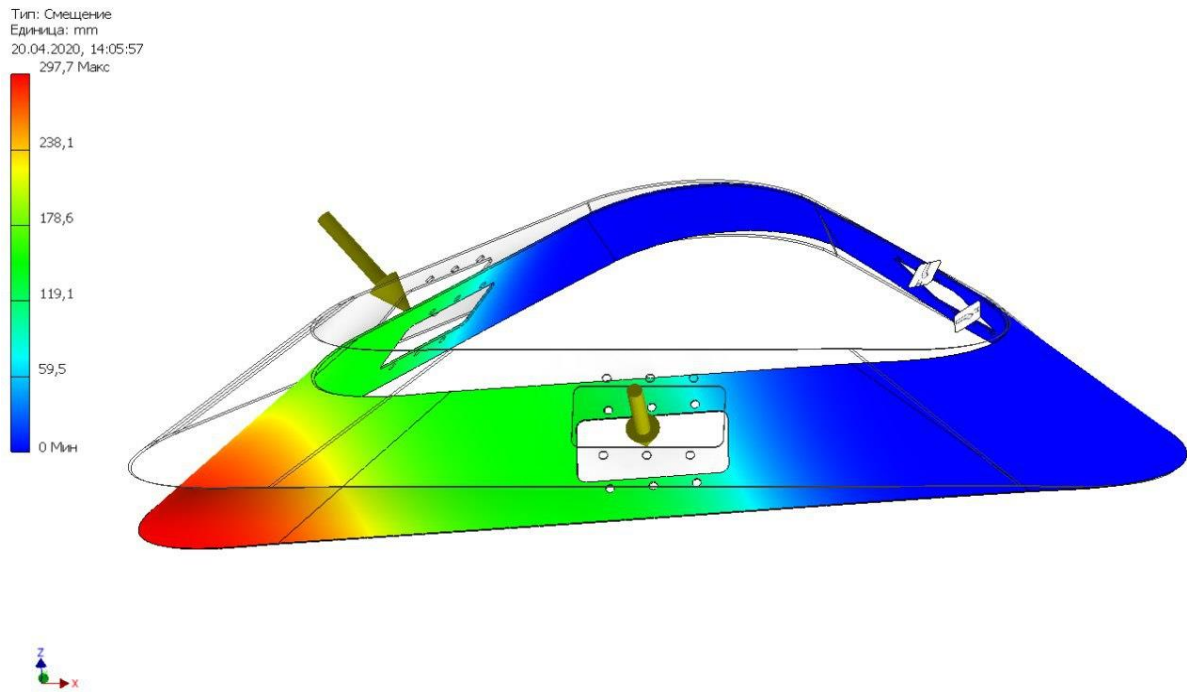


Рис. 4.1.2.6. Результати аналізу пірамідоподібної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення на зміщення

Висновок: запропонований варіант пірамідоподібної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення не задовільняє поставлених для неї вимог по міцності та жорсткості. До того ж даний варіант рами (пірамідоподібна) є досить габаритним, що може спричинити до незручностей під час її транспортування чи експлуатації.

4.1.3 Розрахунок напружено-деформованого стану рами внутрішньої поверхні тора

Розглянемо наступний варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Варіант рами: внутрішня торова поверхня (рис. 4.1.3.1).

Наступним варіантом є внутрішня торова поверхня рами. Геометрія даної поверхні обумовлена високою ступеню міцності, жорсткості та опором до моментів кручення (подібно до стандартного профіля швеллера). Внутрішня торова поверхня є зручною для викладки препрега для подальшого спікання в автоклаві.

Дана форма забезпечує рівномірне розподілення навантаження від маніпулятора, штанг змінної довжини, та гіроскопічних установок по всій поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Габарити даної рами співпадають з першим циліндричним варіантом.



Рис. 4.1.3.1 Третій варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення (внутрішня торова поверхня)

Змоделюємо внутрішню торову поверхню рами роботомеханічного механізму. Виконаємо отвори для розміщення та кріплень сервоприводів штанг змінних довжин (рис. 4.1.3.1) .

Маса рами внутрішньої торової поверхні роботомеханічного комплексу спеціального призначення становить 28.015 кг, що майже на 12 кг менше старої рами (рис. 4.1.3.2).

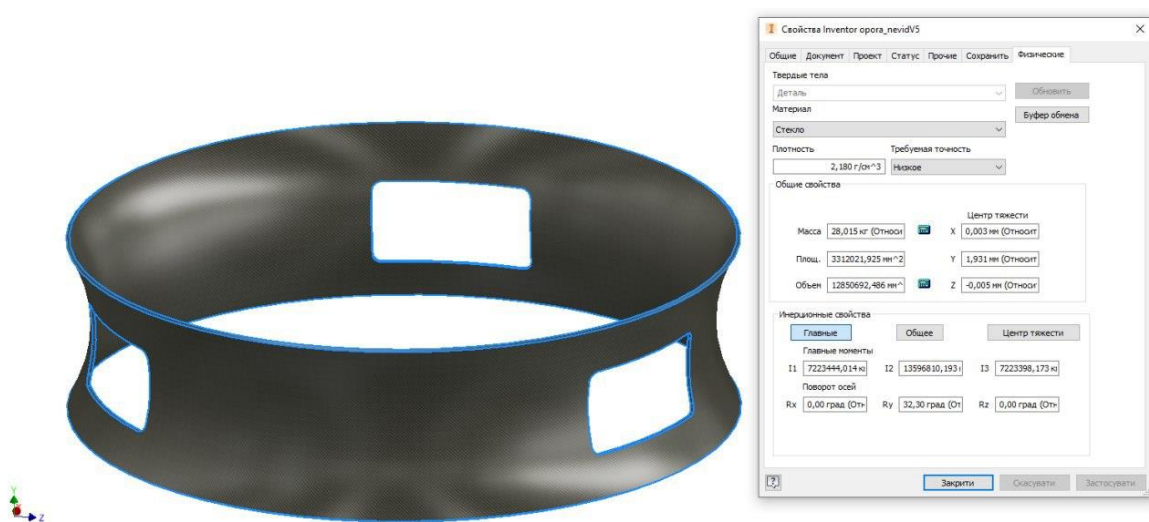


Рис. 4.1.3.2. Параметры внутренней торовой поверхности рамы роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Змоделюємо схему прикладення навантаження та проаналізуємо як це навантаження впливає на раму. Сумарне навантаження на раму становить 200 кг.

Враховуючи характер прикладення навантажень та відсутність ребер жорсткості, рама змінює свою початкову форму. Прикладені навантаження вигинають раму до форми наближеної до однопорожнинного гіперboloїда (рис. 4.1.3.3).



Рис. 4.1.3.3. Аналіз навантажень внутрішньої торової поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Проаналізуємо коефіцієнт запасу міцності рами після прикладення навантажень (рис. 4.1.3.4). У нашому випадку коефіцієнт запасу міцності, становить більше одиниці, а саме з умови міцності при статичному навантаженні $1.5 > \llcorner 1.81 \gg$. Тобто, прикладені навантаження не досягають граничних навантажень, які в свою чергу провокують необоротні процеси та можуть призвести до зламу рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

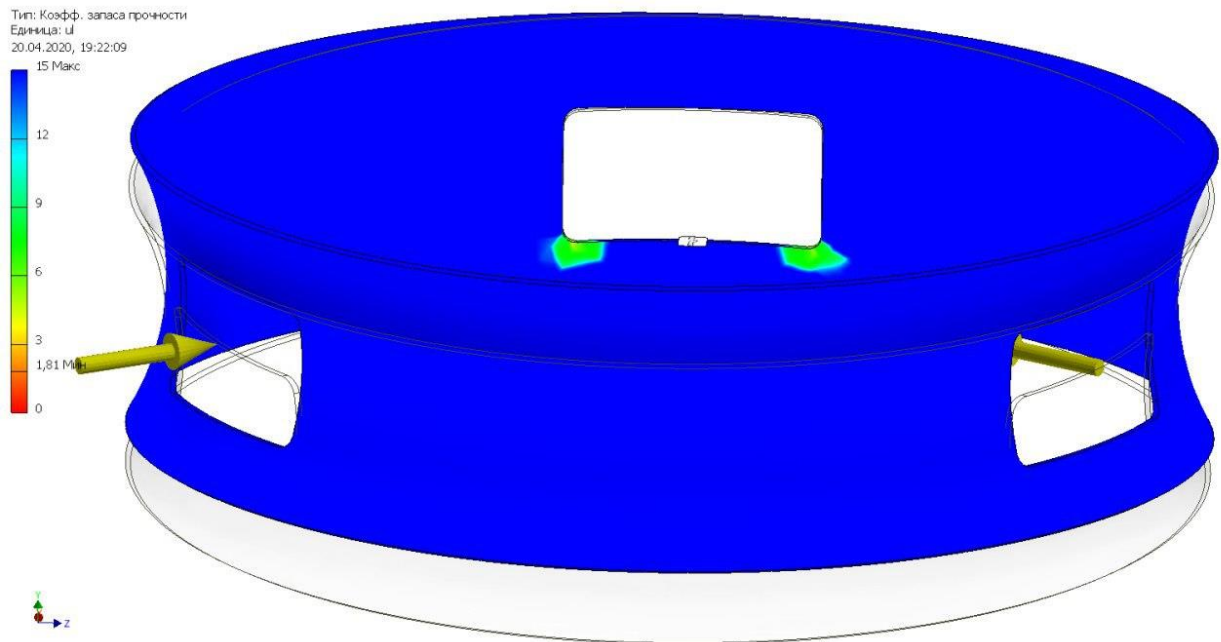


Рис. 4.1.3.4. Результати аналізу внутрішньої торової поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення на коефіцієнт міцності

Оскільки умова міцності при статичному навантаженні виконується $1.5 > \llcorner 1.81 \gg$, то прикладені навантаження не призводять до руйнування рами (рис. 4.1.3.5).

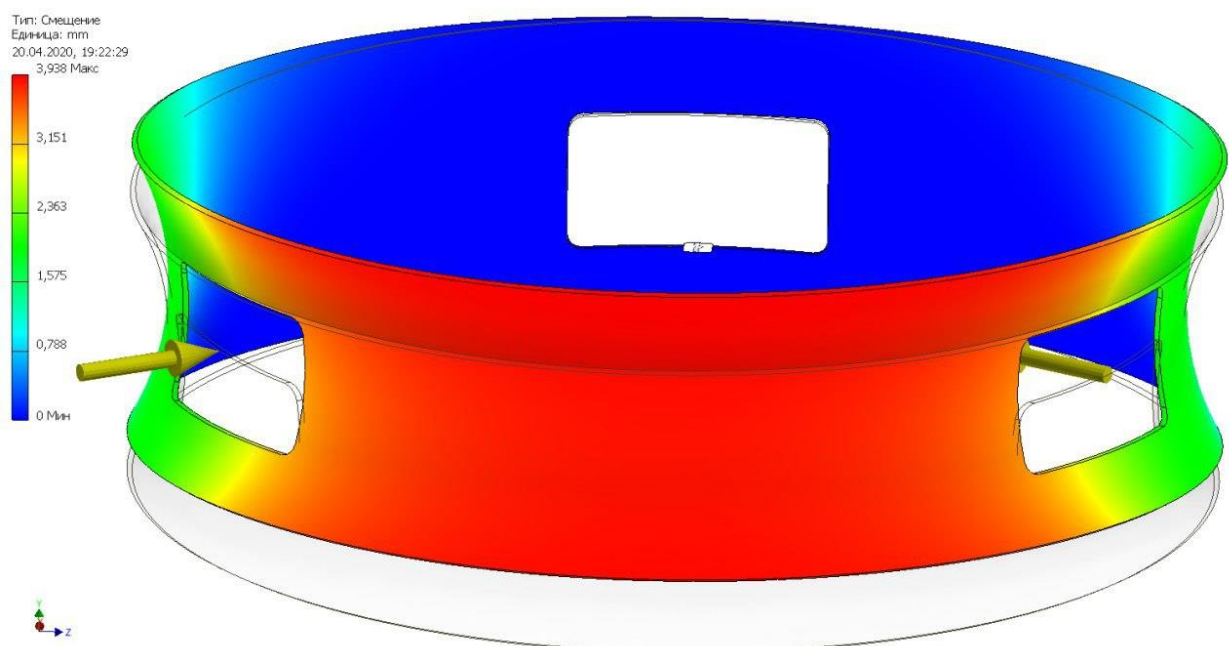


Рис. 4.1.3.5. Результати аналізу внутрішньої торової поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення на зміщення

Висновок: запропонований варіант рами внутрішньої торової поверхні роботомеханічного комплексу спеціального призначення задовільняє поставлені для неї вимоги по міцності та жорсткості.

4.1.4 Розрахунок напружено-деформованого стану рами зовнішньої поверхні тора

Розглянемо ще один варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення, що є подібним до варіанту внутрішньої торової поверхні. Варіант рами: зовнішня торова поверхня (рис. 4.1.4.1).

Наступним варіантом є зовнішня торова поверхня рами. Геометрія даної поверхні обумовлена високою ступеню міцності, жорсткості та опором до моментів кручення (подібно до стандартного профіля швеллера). Зовнішня торова поверхня є зручною для викладки препрега для подальшого спікання в автоклаві.

Дана форма забезпечує рівномірне розподілення навантаження від маніпулятора, штанг змінної довжини, та гіроскопічних установок по всій поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Габарити даної рами співпадають з першим циліндричним варіантом.

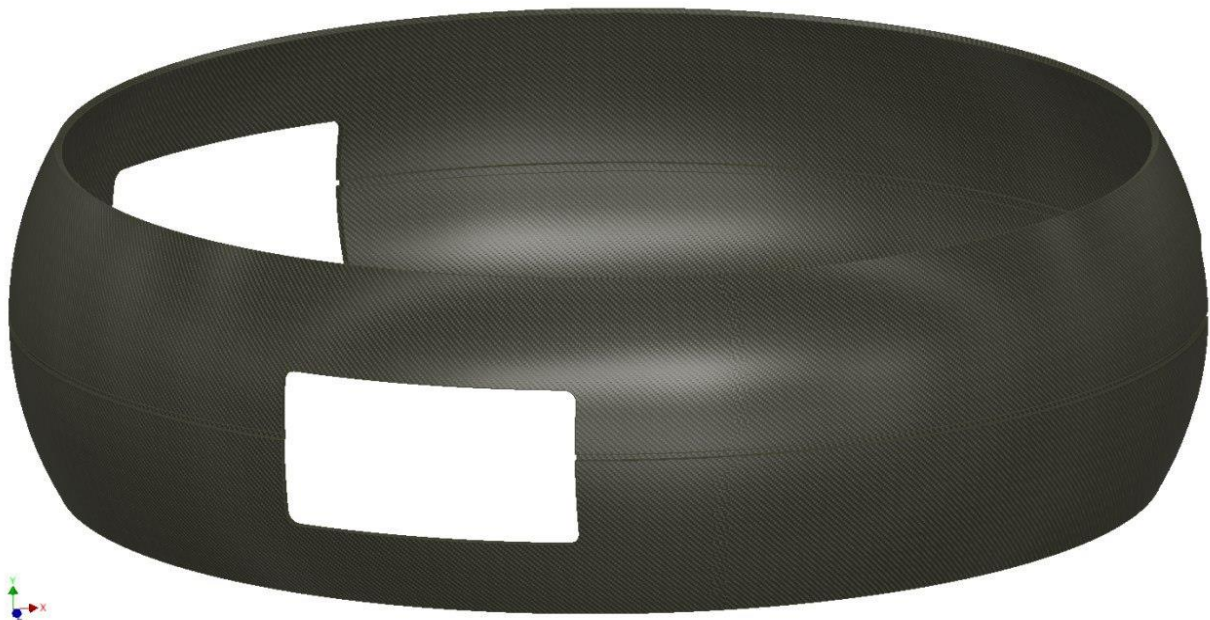


Рис. 4.1.4.1. Четвертий варіант рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення (зовнішня торова поверхня)

Змоделюємо зовнішню торову поверхню рами роботомеханічного механізму. Виконаємо отвори для розміщення та кріплення сервоприводів штанг змінних довжин (рис. 4.1.4.1) .

Маса рами зовнішньої торової поверхні роботомеханічного комплексу спеціального призначення становить 27 кг, що майже на 13 кг менше старої рами (рис. 4.1.4.2).

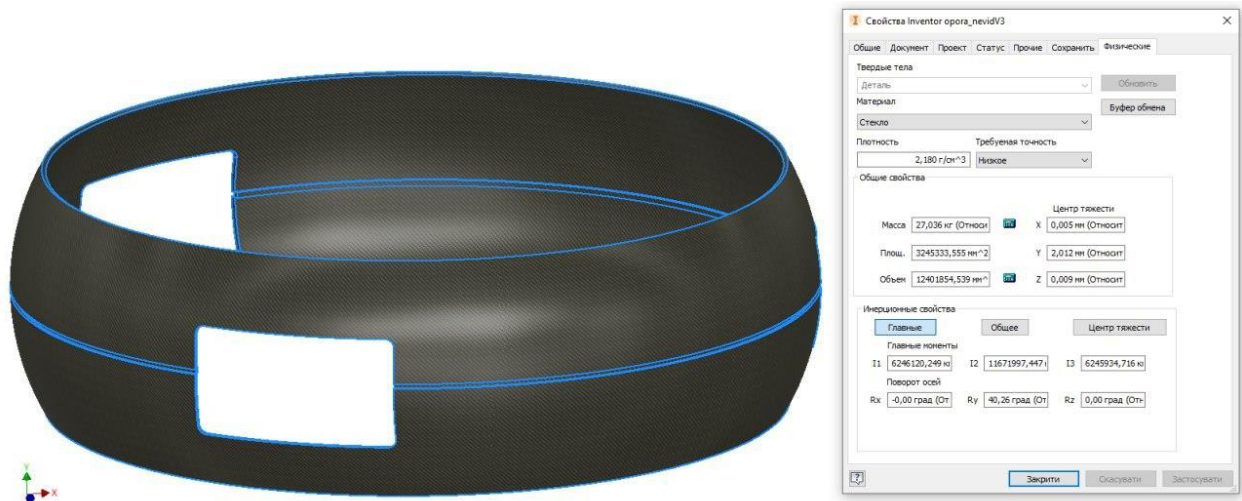
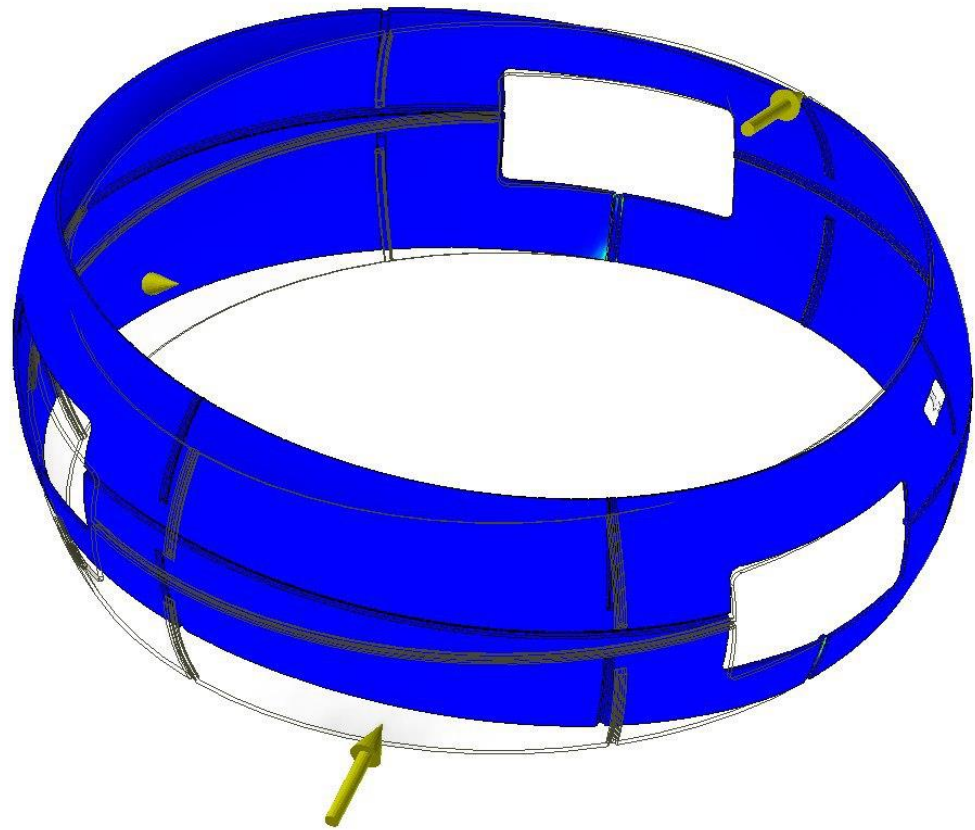
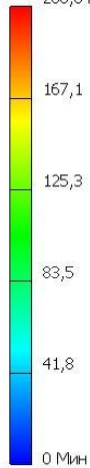


Рис.4.1.4.2. Параметры зовнішньої торової поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Змоделюємо схему прикладення навантаження та проаналізуємо як це навантаження впливає на раму. Сумарне навантаження на раму становить 200 кг.

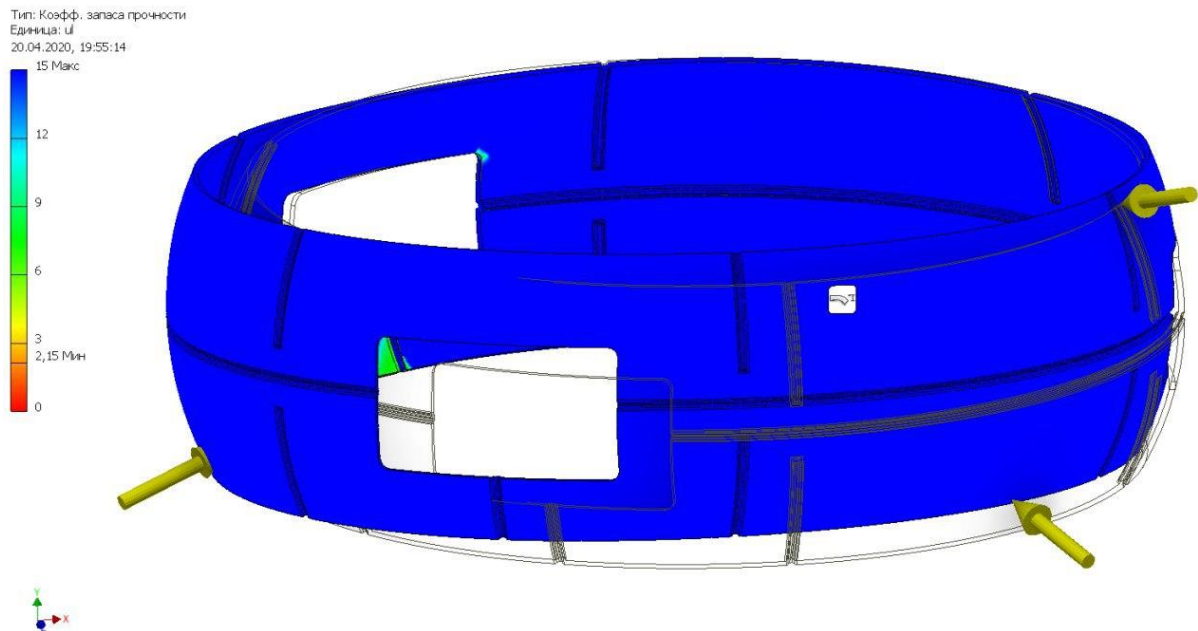
Враховуючи характер прикладення навантажень та відсутність ребер жорсткості, рама змінює свою початкову форму. Прикладені навантаження вигинають раму до циліндричної форми (рис.4.1.4.3).

Тип: Напряжение по Мизесу
Единица: МПа
06.05.2020, 18:24:14
208,8 Макс.



*Рис. 4.1.4.3. Аналіз навантажень зовнішньої торової поверхні рами
роботомеханічного комплексу спеціального призначення*

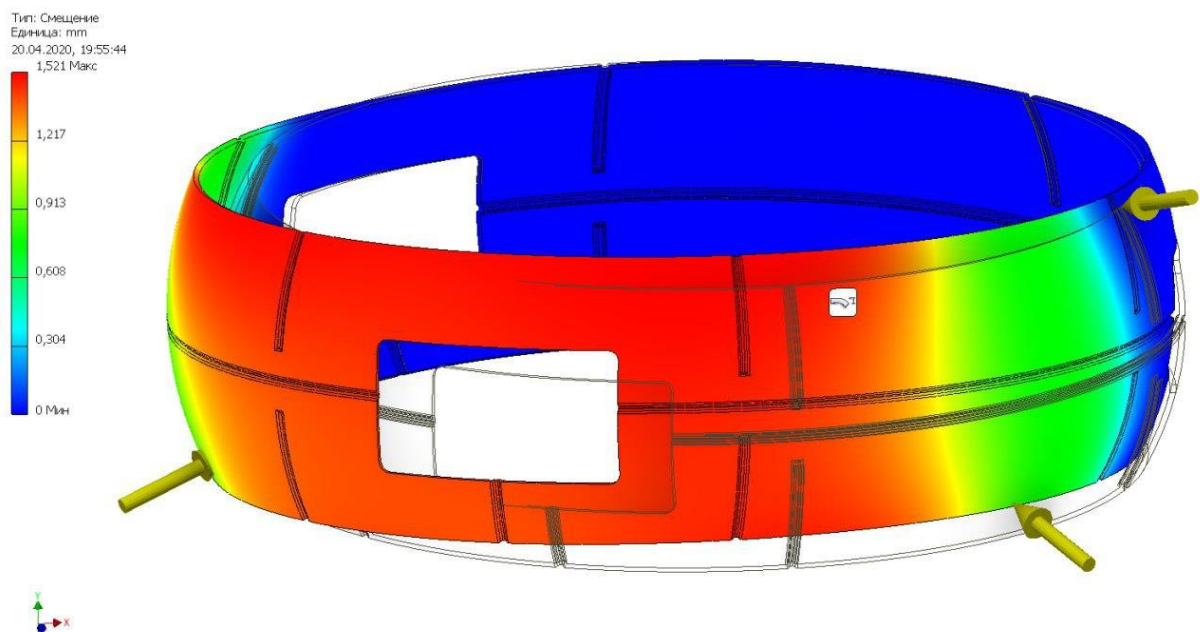
Проаналізуємо коефіцієнт запасу міцності рами після прикладення навантажень (рис. 4.1.4.4). У нашому випадку коефіцієнт запасу міцності, становить значно більше 1.2, а саме з умови міцності при статичному навантаженні $1.5 > \llcorner 2.15 \llcorner$. Тобто, прикладені навантаження не досягають граничних навантажень, які в свою чергу провокують необоротні процеси та можуть призвести до зламу рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.



*Рис. 4.1.4.4. Результати аналізу зовнішньої торової поверхні рами
роботомеханічного комплексу спеціального призначення на коефіцієнт
міцності*

Оскільки умова міцності при статичному навантаженні виконується

$4.2 > \langle 2.15 \rangle$, то прикладені навантаження не призводять до
руйнування рами (рис. 4.1.4.5).



*Рис. 4.1.4.5. Результати аналізу зовнішньої торової поверхні рами
роботомеханічного комплексу спеціального призначення на зміщення*

Висновок: запропонований варіант рами зовнішньої торової поверхні роботомеханічного комплексу спеціального призначення задовільняє поставлені для неї вимоги по міцності та жорсткості.

4.2 Проведення підбору оптимального рішення поверхні рами роботизованого комплексу спеціального призначення

Циліндрична форма рами є найзручнішою для виготовлення із тканинного композитного матеріалу (у нашому випадку препрегу). Ще однією перевагою циліндричної форми рами є її легкість в обслуговуванні, адже дана конструкція забезпечує легкий доступ до всіх важливих вузлів механізму. Перший варіант циліндричної форми рами був найлегшим для виконання моделі симуляції та аналізу напружено-деформованого стану.

Для варіанту циліндричної поверхні також був би актуальним метод намотки композиційного матеріалу. Коли для надання форми використовують цілісну нитку або стрічкоподібний композит, і після обмотки проводять процес заливки матриці з подальшою термообробкою в автоклаві.

Другий варіант пірамідоподібної поверхні для рами роботомеханічного наземного комплексу спеціального призначення є незручнішим для оптимізації старої рами і інтегрування комплексу штанг змінної довжини в новий варіант конструкції. Також ще однією додатковою перевагою цього варіанту є зручність в обслуговуванні комплексу.

Рама з пірамідоподібною поверхнею має більші відносно інших варіантів габарити, що є істотним недоліком при її транспортуванні та експлуатації (рис. 4.2.1).



*Рис. 4.2.1. Габарити пірамідоподібної поверхні для рами
роботомеханічного наземного комплексу спеціального призначення.*

Перший варіант циліндричної поверхні та другий варіант пірамідоподібної поверхні для рами роботомеханічного наземного комплексу спеціального призначення не відповідає заданим вимогам міцності та жорсткості механізму. Тому ми змушені відмовитись від цих варіантів.

Третій та четверті варіанти, на відміну від перших двох, задовільняють задані вимогу по міцності та жорсткості. Також дані варіанти є придатними для їх виготовлення з композиційного матеріалу кількома різними способами. Метод намотки є простим в виконанні але не актуальним для нашого завдання. Це пов'язано із трудоемністю та часозатратністю необхідності в забезпеченні обладнання для його виконання. Також дані варіанти є придатними для їх виготовлення із напівфабриката (препрег), з подальшою вакуумізацією для його подальшого надання геометрії форми внутрішньої та зовнішньої поверхонь тора.

Наступними перевагами цих двох варіантів є їх достатньо високі коефіцієнти запасу міцності та висока жорсткість.

Відмінною рисою варіанту чотири від варіанту три є його вищий коефіцієнт запасу міцності та відповідно вища жорсткість. Також при використанні варіанта чотири конструкція механізму виглядає наступним чином: сервоприводи, які відповідають за переміщення штанг знаходяться ззовні тороподібної поверхні, що полегшує операторам та механікам обслуговування даного механізму, чого не можна спостерігати у варіанті три (рис. 4.2.2, рис. 4.2.3).

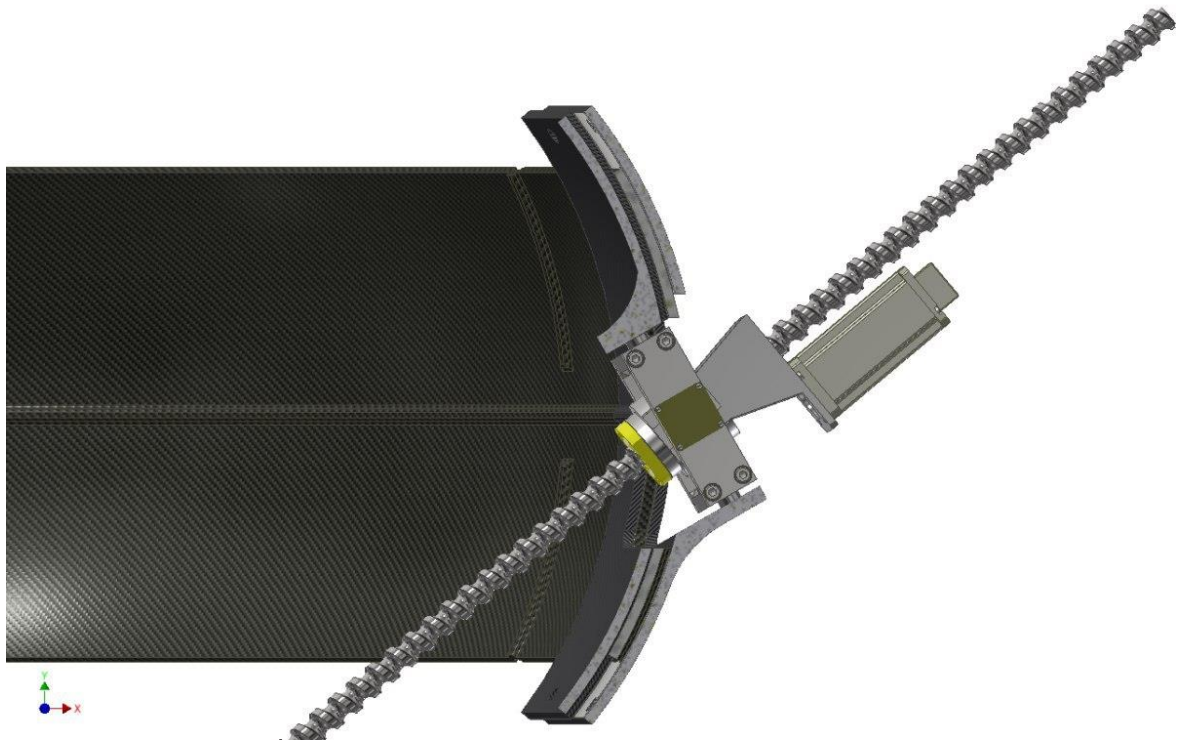


Рис. 4.2.2. Конструкція механізму при зовнішній тороподібній формі рами

Також важливою характеристикою є естетичний вигляд механізму, що впливає на його попит серед замовників (Рис).



Рис. 4.2.3. Зображення моделі рами роботомеханічного наземного комплексу спеціального призначення форми зовнішньої поверхні тора

Тому четвертий варіант є більш пріоритетним у використанні конструкції рами роботомеханічного наземного комплексу спеціального призначення.

Висновки: нова рама роботизованого комплексу спеціального призначення має форму зовнішньої частини тора.

Рама такої форми має високу міцність і жорсткість конструкції. Також маса рами в порівнянні із масою вихідної рами зменшилася на 13 кг і становить 27 кг.

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ВУЗЛІВ ВІД КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ДО МЕТАЛЕВОЇ СТРУКТУРИ ОБ'ЄКТА ВДОСКОНАЛЕННЯ, ПРИ КОНСТРУЮВАННІ МАНІПУЛЯТОРА З МПК ТА АНАЛІЗ ПІДБРАНИХ РІШЕНЬ

5.1 Розроблення композиційних накладок та фрикційних перехідних пластинок для кріплення МПК до рами роботизованого комплексу спеціального призначення

При конструюванні із композиційних матеріалів, перед інженером ставиться досить непросте завдання. Його складність полягає в тому, щоб не лише розрахувати напрямки волокон, спосіб переплету, кількість шарів і т.п., а й забезпечити геометрію конструйованого елемента таким чином, щоб процес його виготовлення був максимально зручним, не часо- та трудозатратним, без втрат міцності та жорсткості при заданій вартості. Також при конструюванні із композиційних матеріалів існує ряд відмінностей від конструювання із металевих сплавів.

Композиційні матеріали є досить чутливими до наявності концентраторів напружень.

Рама роботомеханічного комплексу спеціального призначення виконана у формі зовнішньої поверхні тора, що забезпечило раму високою міцністю, жорсткістю та значним зменшенням ваги в порівнянні із попередньою металевою версією. Також в рамі виконано 3 отвори для розміщення та закріплення механізму переміщення схвата. Отвори виконані таким чином, щоб забезпечити свободу пересування для штанг змінної довжини. Рама виконана із композиційного матеріалу Style 7781 E-Glass. Тому досить важливим є процес забезпечення рівномірної передачі всіх навантажень від елементів, створюють ці навантаження.

Механізм переміщення схвата монтується до рами за допомогою втулок на гіроскопічних рамках, що імітують підшипник ковзання. Тобто,

перед нами поставлена задача створення кріплення механізму переміщення схвата із рамою, забезпечивши рівномірно передачу навантаження на раму роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Також необхідно пам'ятати про особливості кріплень елементів із композиційних матеріалів. Через свій анізотропний характер, композиційний матеріал може в одному й тому ж місці кріплення сприймати різні навантаження в залежності від багатьох факторів, таких як стискаюча сила елемента кріплення, наявність витків чи різьби на елементі кріплення, ширина пакета, наявність втулки в місці кріплення, величини площадки дії крайніх частин елемента кріплення на композиційний матеріал, спосіб виконання отвору під кріплення, характер посадки кріплення і т.п.

Приходимо до висновку, що нам необхідно створити перехідний елемент, який виконуватиме дві важливі функції: монтування механізму переміщення схвата, та рівномірна передача навантаження від цього механізму до рами.

Ще за шкільної програми нам відомо, що чим більша площа сприймання навантаження, тим менший тиск на об'єкт. Тому логічним є забезпечення великої площі контакту між рамою та перехідним елементом.

Для збільшення площі контакту, варто щоб перехідний елемент «охоплював» раму у зоні контакту, тому назвемо цей елемент «накладка» (рис. 5.1.1).

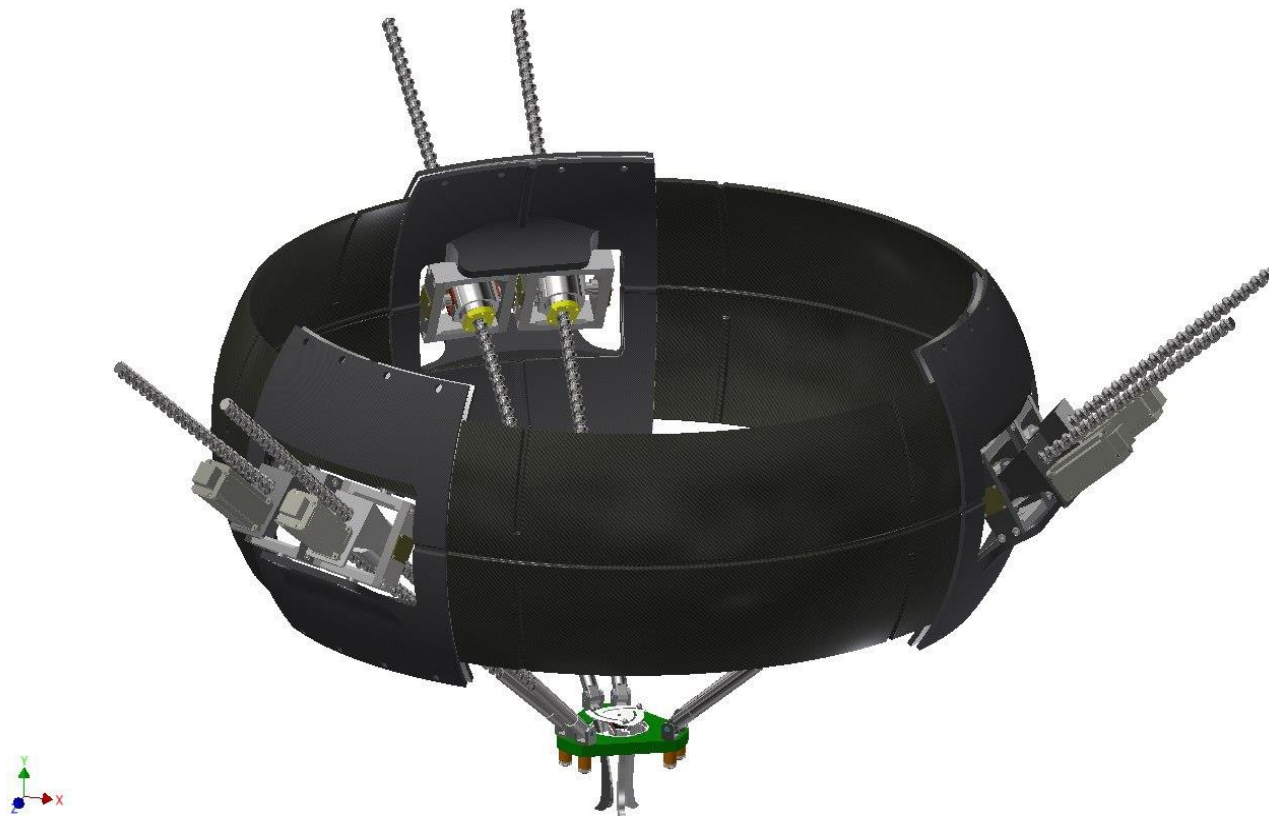


Рис. 5.1.1. Зображення накладок з рамою роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Матеріал композиційних накладок потрібно підібрати із вимог високої міцності, високої жорсткості та невеликої ваги. Тому накладки виконаємо із композиційних матеріалів. Для виготовлення накладок на раму роботомеханічного комплексу спеціального призначення використаємо напівфабрикат (препрег) Style 7781 E-Glass (рис. 5.1.2).



Рис. 5.1.2. Зображення заготовки напівфабриката препрег

Напівфабрикат препрег після просякнення матрицею покривають захисною плівкою для запобігання пошкодження композиційного матеріалу.

Кожна парна накладка сприймає навантаження від механізму переміщення схвата, до якого входять: шість штанг змінної довжини, на кожній з яких є гіроскопічні рамки, сервопривід та механізм схвату (рис.5.1.3).



Рис. 5.1.3. Схематичне розташування композиційних, металічних накладок, втулок та болтових з'єднань

Пари накладок розміщуються по геометрії рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення рівномірно віддалені одна від одної (рис. 5.1.4, рис. 5.1.5, рис. 5.1.6, рис. 5.1.7).

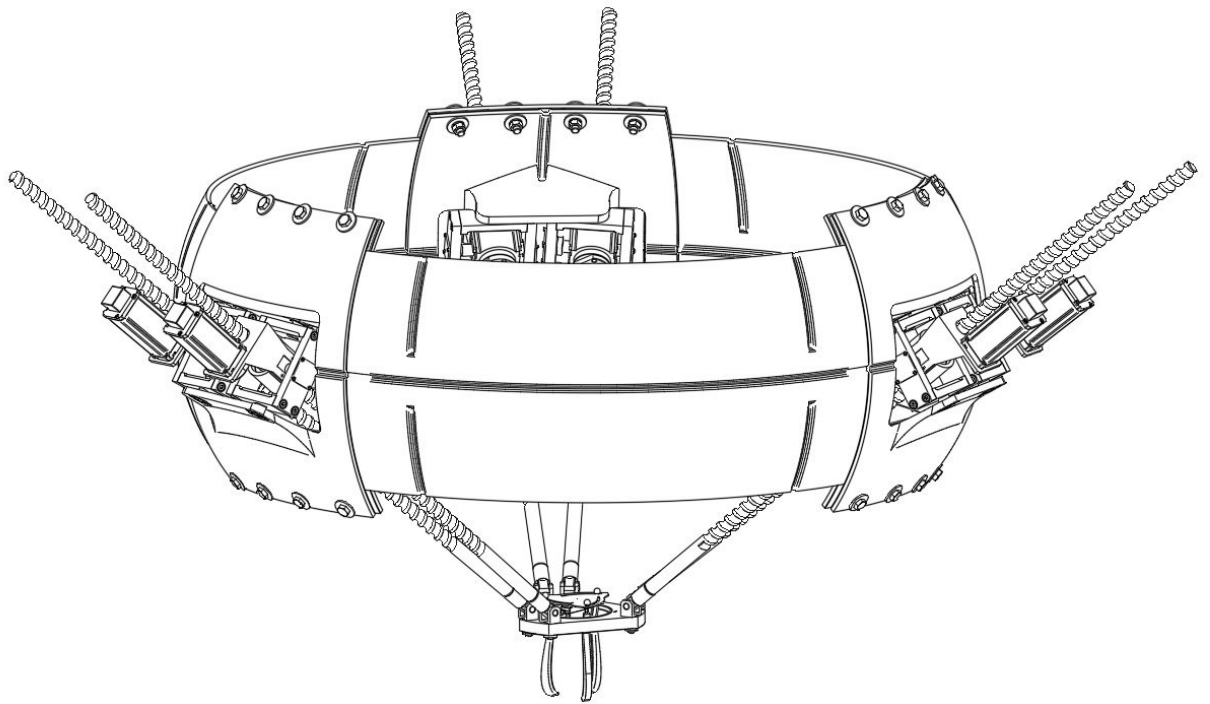


Рис. 5.1.4. Зображення роботомеханічного комплексу спеціального призначення без механізму крокування

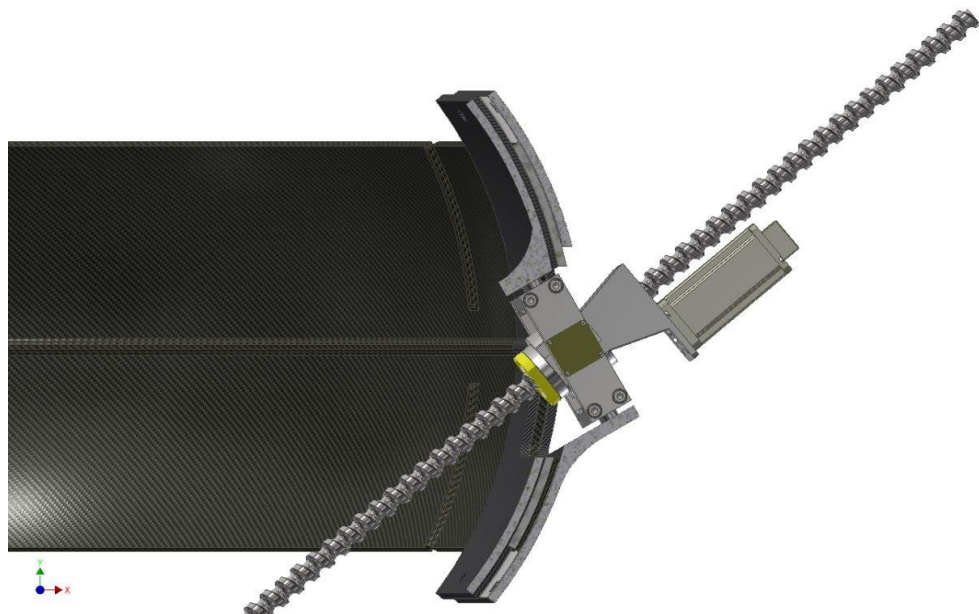


Рис. 5.1.5. Зображення поперечного перерізу накладок для монтування механізму переміщення схвату



*Рис. 5.1.6. Зображення рівномірно розміщених пар накладок для рами
роботомеханічного комплексу спеціального призначення*



*Рис. 5.1.7. Зображення вигляду вверху рівномірно розміщених пар
накладок для рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення*

Пара накладок представляє собою внутрішню та зовнішню накладку.

Геометрія внутрішньої поверхні зовнішньої накладки відповідає геометрії зовнішньої поверхні рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення (рис. 5.1.8). В рамі присутній виступ для кріплення механізму, що працює за принципом паралельної кінематики (механізм схвату).

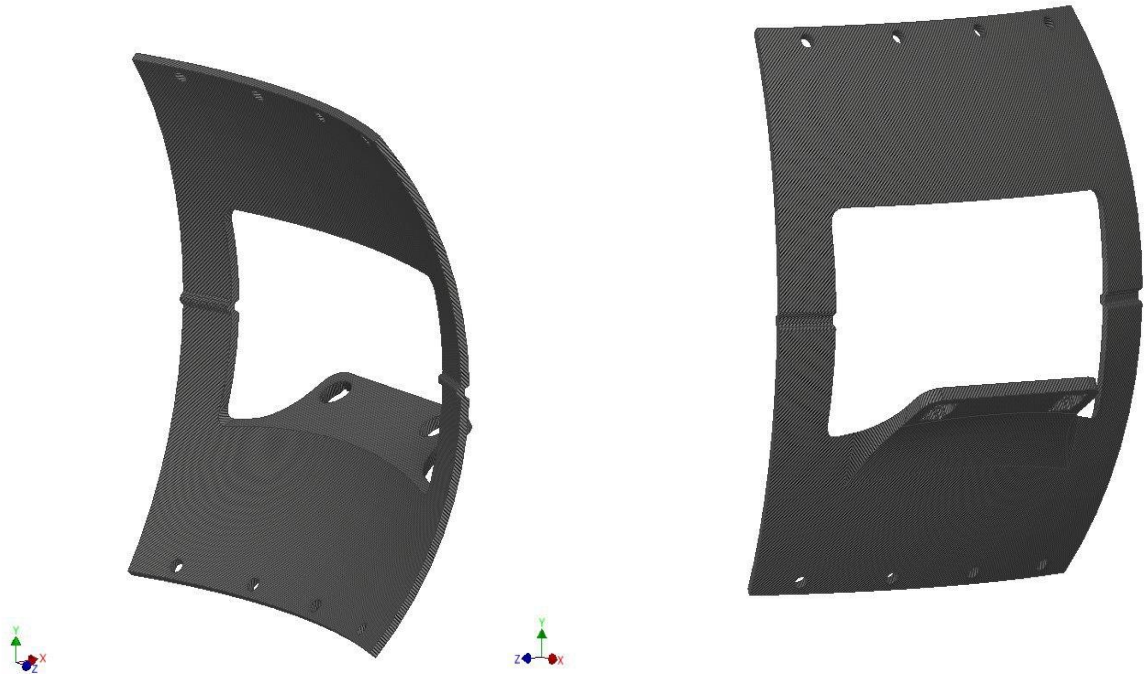


Рис. 5.1.8 Зображення зовнішньої композиційної накладки

Зовнішня композиційна накладка поверхнево контактує із композиційною рамою роботомеханічного комплексу спеціального призначення. Тобто більша частина навантаження від ваги механізму з паралельною кінематикою (механізм руху схвату) сприймається лише поверхневими шарами, що призводить до нерівномірного навантаження всіх волокон слоїв композиційної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Сумарне навантаження від механізму паралельної структури, що переміщує схват буде сприйматися лише слоями, що лежать близько до поверхні композиційного матеріалу. Нерівномірне розподілення

прикладених навантажень спричинить завчасну руйнування композиційного матеріалу.

Спочатку відбувається руйнування волокон, що розміщуються близьких до поверхонь слоїв. Після цього, навантаження почне сприйматися тими волокнами що знаходяться в слоїв, що розміщені як най далі від поверхонь композиційного матеріалу рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Для того, щоб запобігти руйнування рами через нерівномірне розподілення навантажень, використаємо додатковий перехідний елемент. Таким елементом стануть металеві фрикційні перехідні пластини (рис.5.1.9).

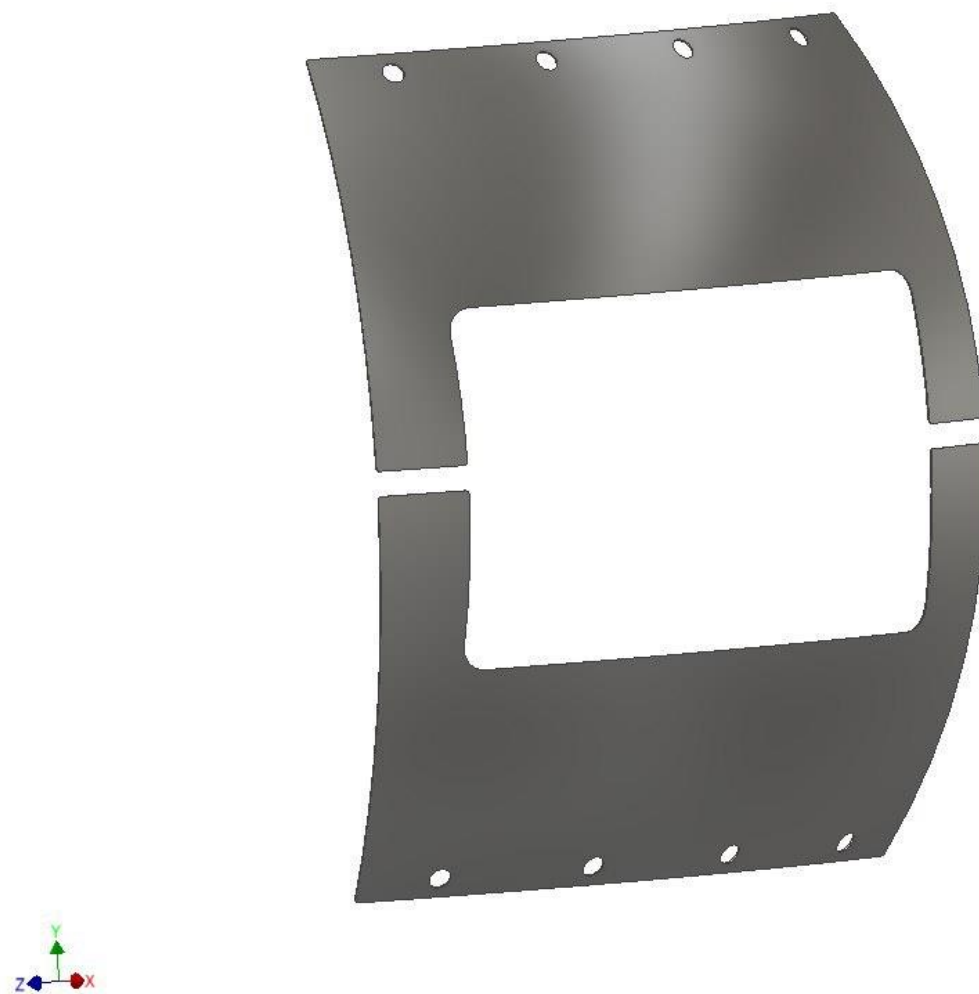


Рис.5.1.9. Фрикційна зовнішня перехідна пластина для накладок

Накладки виготовлені із тонкого листового прокатного матеріалу вуглецевої сталі товщиною 0.5 мм. В пластині виконані спеціальні вирізи форми прямокутного трикутника. Трикутники розміщені на пластині в порядку чергування в ряді: починаючи з першого вирізу непарні вирізи вигнуті по одну сторону пластини, починаючи з другого вирізу всі парні вирізи по іншу сторону пластини (рис. 5.1.10). Габаритні розміри пазу становлять висота 6 та ширина 4.

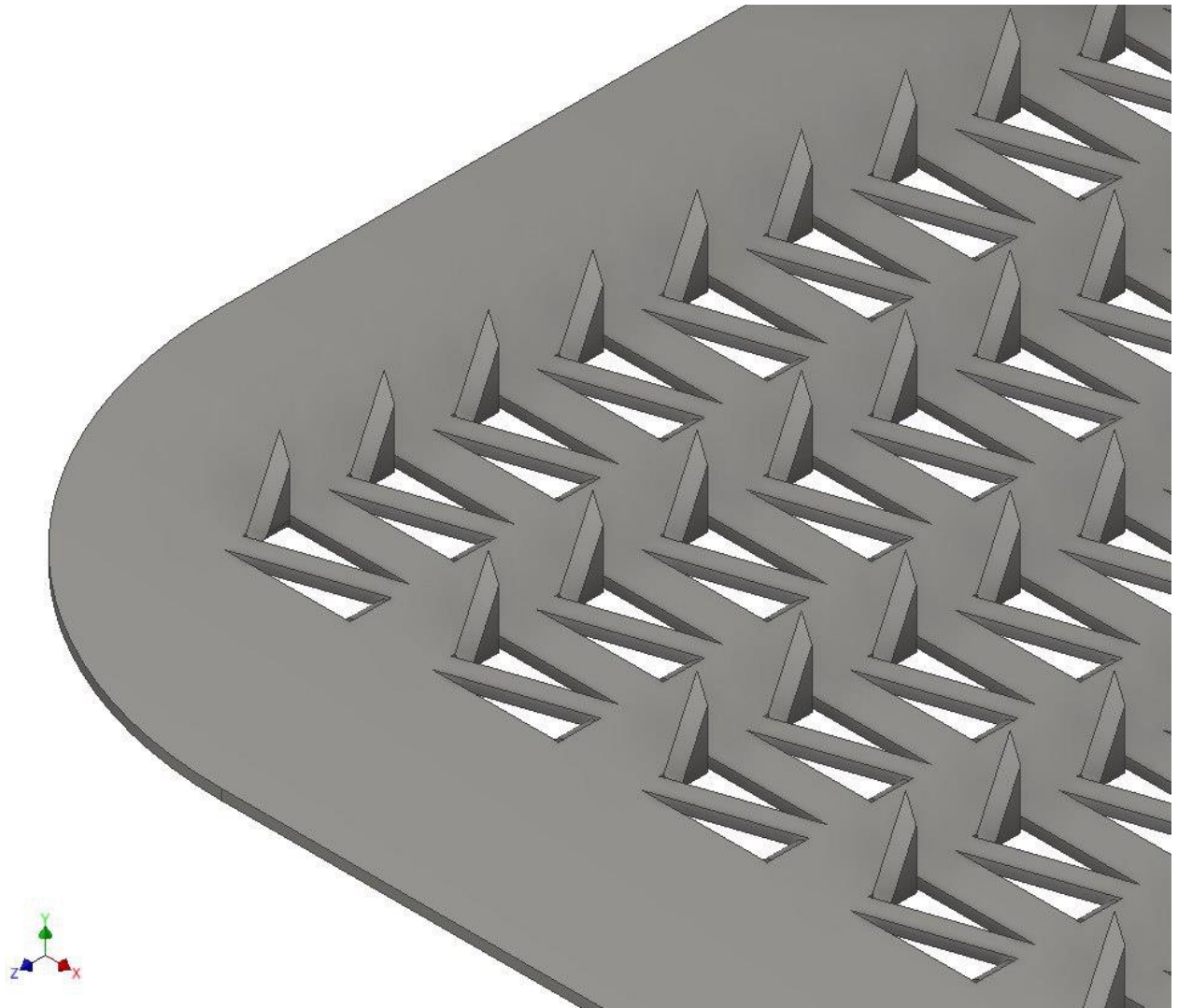


Рис. 5.1.10. Зображення трикутних вирізів на фрикційні перехідній пластині

Кожна голочка проникає в поверхню, що з нею контактує, у нашому випадку з однієї сторони це зовнішня поверхня рами а з іншої внутрішня поверхня зовнішньої композитної накладки. Голочки проникають в

композиційний матеріал та розміщуються в матриці поміж армуючих волокон композиційного матеріалу.

Використання таких пластин призведе до рівномірного перерозподілу навантажень по всій площині контакту та по товщині рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

Для забезпечення геометрії внутрішньої поверхні накладки при її виготовленні використаємо спеціальну оснастку що в точності копіює поверхню зовнішній сторони рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення. Накладка має характерний виступ у нижній частині з площадкою для кріплення механізму паралельної структури, що переміщує схват (рис. 5.1.11).

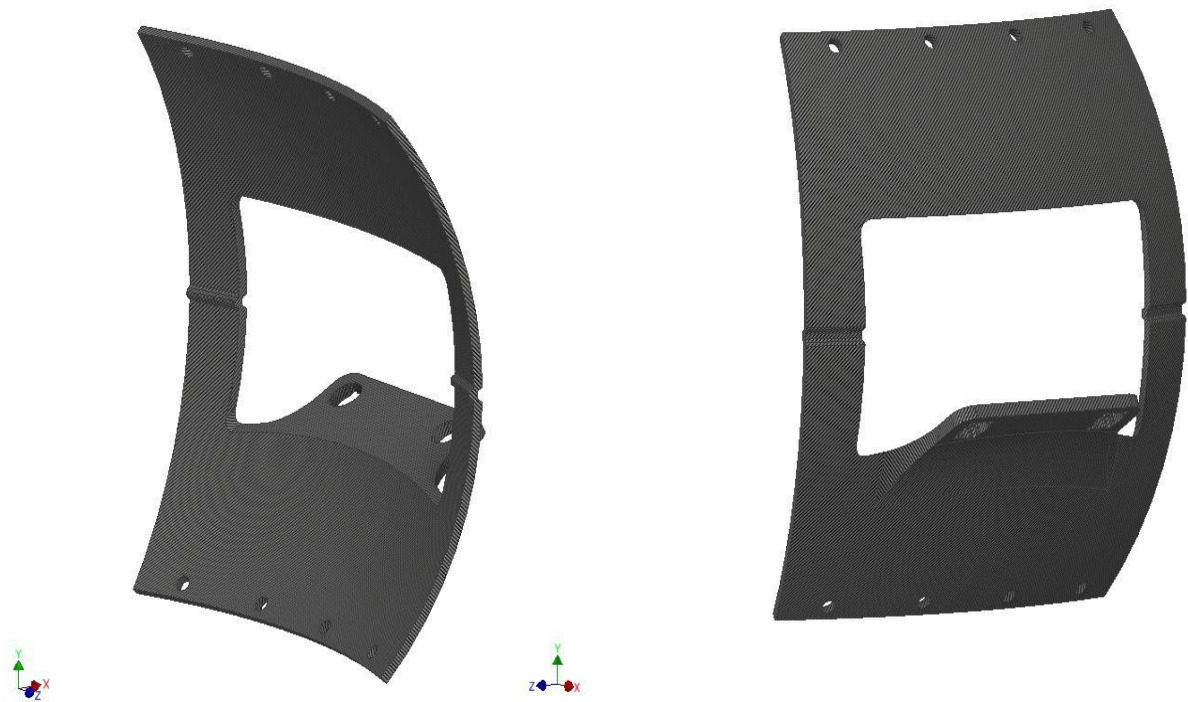


Рис. 5.1.11. Зовнішня композиційна пластина для кріплення механізму паралельної структури, що переміщує схват

Особливістю виготовлення таких накладок є процес нарощування шарів композиційного матеріалу у місцях прикладання високого навантаження, а саме в місці виступу. Під час викладення на оснастку слоїв композиційного матеріалу ми додаємо до структури додаткові шари композита , а саме цілісну структуру препрегу по обидві сторони

дзеркально зі структурою $[0/90/\pm 45/\pm 45/90/0]$. Нарощування слоїв композиційного матеріалу необхідно додавати зберігаючи дзеркальність напрямків волокон композиційного матеріалу. Тому нова структура після нарощування матиме вигляд $[0/90/\pm 45/0/90/\pm 45/\pm 45/90/0/\pm 45/90/0]$.

У площині виступу виконано 2 наскрізні отвори діаметром 33 мм у які в подальшому будуть монтуватися втулки діаметром 30 мм, та шириною стінки 1.5 мм. Функція втулок полягає у рівномірному розподілу навантаження на слої композиційного матеріалу через металеву втулку (рис.5.1.12). По зовнішньому діаметру втулки розміщено 4 вуха із внутрішньою різьбою для болтового кріплення. У втулці вздовж циліндричної поверхні виконано паз. Ширина паза становить 1.5 мм. Функція пазу полягає в забезпеченні місця для розширення металу під час термічної дії в автоклаві.



Рис. 5.1.12. Зображення металевої втулки в нижній частині зовнішньої накладки

Властивості зовнішньої композиційної накладки на раму роботомеханічного комплексу спеціального призначення представлені на (рис. 5.1.13). Вага рами становить 3.5 кг.

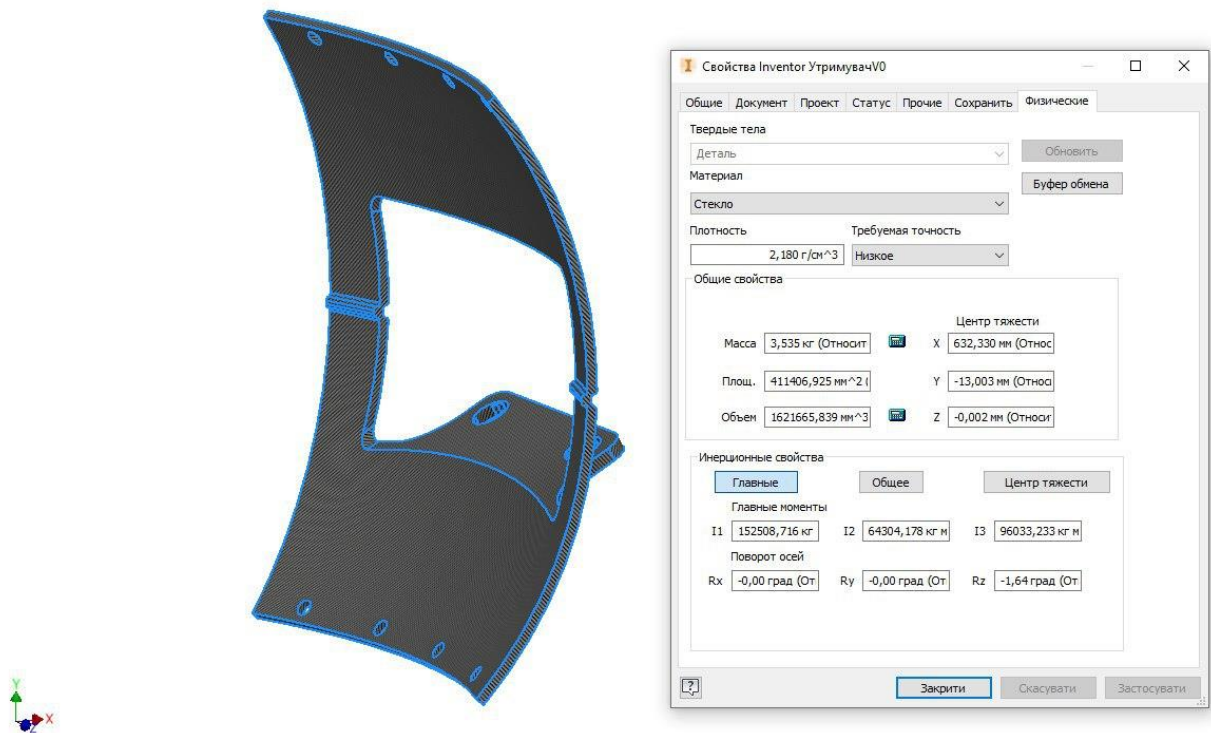


Рис. 5.1.13 Властивості зовнішньої композиційної накладки роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Виготовлення внутрішніх накладок проводиться також як і зовнішніх із композиційного матеріалу. Його використання для виготовлення накладок обумовлене гарними механічними характеристиками, а саме: висока міцність та жорсткість при мінімальній вазі (рис. 5.1.14).



Рис. 5.1.14. Зображення внутрішньої композиційної ланки

Також як і при проектуванні зовнішньої композиційної накладки використовуємо фрикційну перехідну пластину (рис. 5.1.15). Вона забезпечить рівномірну передачу навантаження до рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

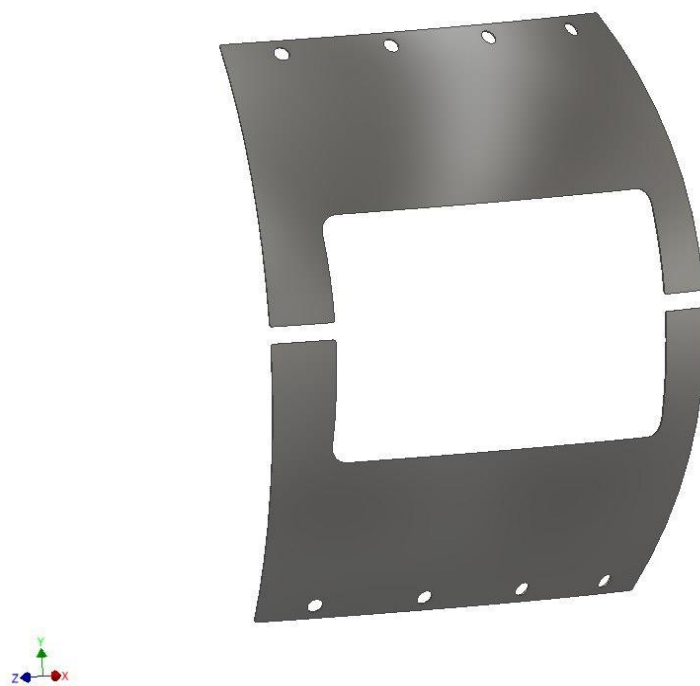


Рис. 5.1.15. Зображення внутрішньої фрикційної накладки

Характеристики внутрішньої композиційної накладки розглянемо на рисунку. Вага однієї внутрішньої композиційної накладки становить 2 кг (рис.5.1.16).

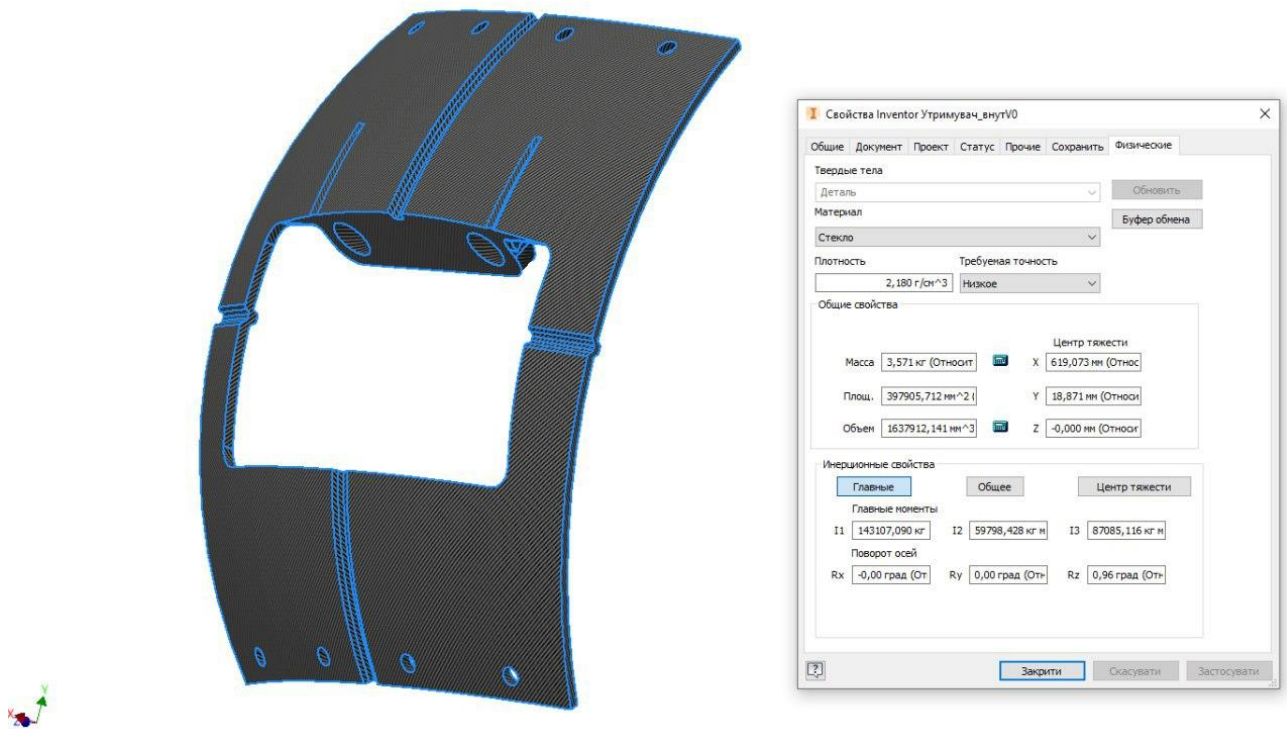


Рис. 5.1.16. Властивості зовнішньої композиційної накладки для рами

Кріплення накладок виконано у нижній частині за допомогою стаканів, куди поміщуються вали від механізму переміщення схвату. Стакан висотою 15 мм та пазом 1.5 мм. Паз виконаний для забезпечення вільного об'єму який забезпечує місце для розширення матеріалу під час термообробки в автоклаві (рис. 5.1.17). Висота накладок є більшою ніж самої рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення. Виступи накладок місять болтові з'єднання.



Рис. 5.1.17. Зображення стакана у верхній частині внутрішньої накладки

У верхній та нижній частині за допомогою болтових з'єднань зовнішні та внутрішні накладки кріпляться між собою. У верхній та нижній частині, де знаходяться кріплення накладок, встановлюються резинові вставки. Це зроблено для запобігнення перекосів та надмірного стягування композитних деталей, адже це призведе до поверхневого руйнування композиційного матеріалу. Вставка виконана із чотирьма пазами, для зручного її монтажу між композиційними накладками (рис.5.1.18).

Болтові з'єднання в композиційних збірках відрізняються від болтових з'єднань в металевих збірках (рис. 5.1.19).

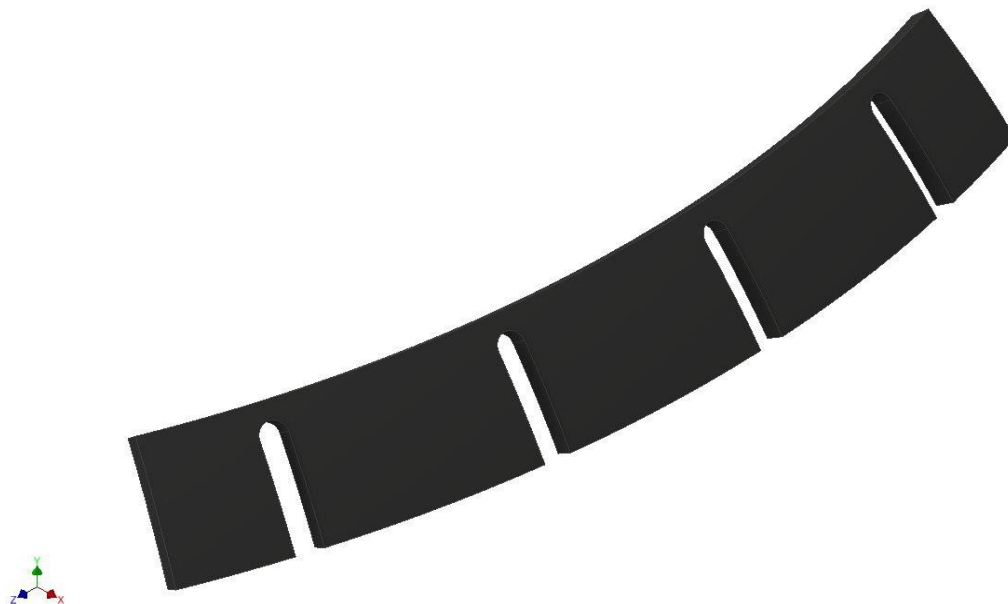


Рис. 5.1.18. Резинова вставка для болтових з'єднань композиційних накладок

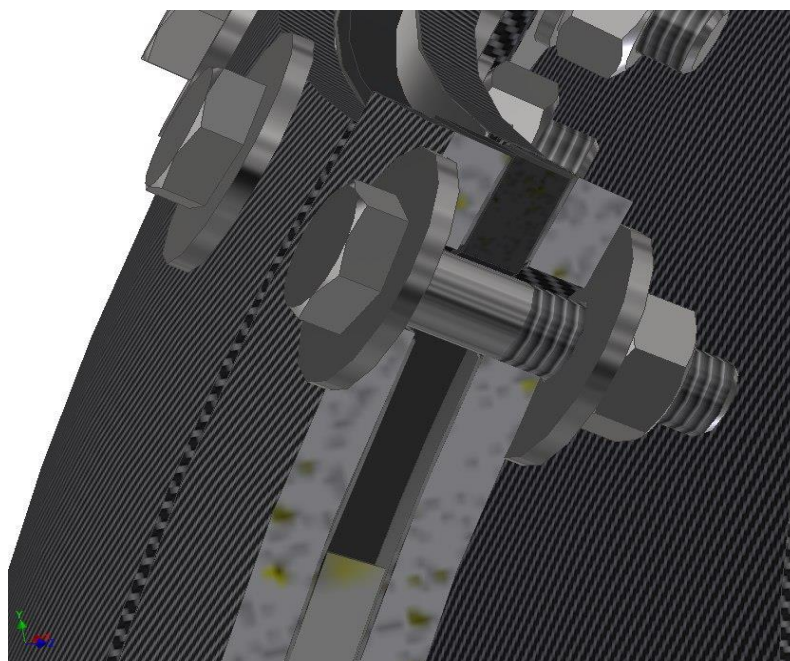


Рис. 5.1.19. Болтове з'єднання із резиновою вставкою

Необхідною вимогою для кріплень в композиційних матеріалах є забезпечення великої площі контакту, що сприймає навантаження від самого кріплення. Тому при використанні звичайного болтового з'єднання перевага надається шайбам зі збільшеним діаметром. Перша шайба

монтуються між головкою болта та композитним матеріалом, а друга між композитним матеріалом та гайкою (рис. 5.1.19).

5.2 Аналіз композиційних накладок для кріплення МПК до рами роботизованого комплексу спеціального призначення

Проведемо аналіз зовнішньої композиційної накладки для кріплення механізму паралельної структури для переміщення схвату. На накладку в місці кріплення механізму паралельної структури для переміщення схвату, діють навантаження від ваги механізму паралельної структури для переміщення схвату, а саме: шести гіроскопічних рамок, шести штанг змінної довжини, шести крокових двигунів та схвату. Загальна вага від ваги механізму паралельної структури для переміщення схвату становить 100 кг (рис 5.2.1).

Найбільші навантаження спостерігаються в зоні кріплення. Максимальне навантаження по Мізесу становить 10.17 МПа.

Тип: Напряжение по Мизесу
Единица: МПа
23.04.2020, 1:06:34
16,95 Макс

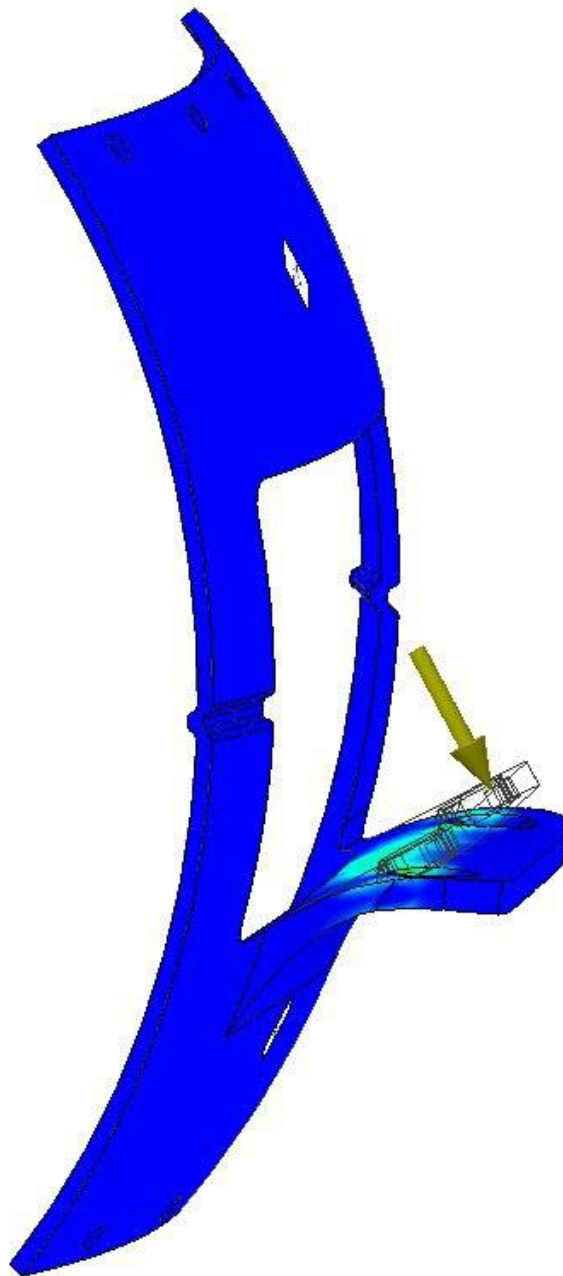
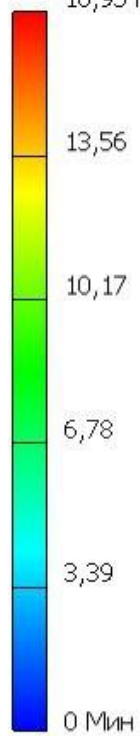


Рис.5.2.1. Аналіз навантаження на зовнішню накладку від ваги крокуючої ланки

Коефіцієнт запасу міцності зовнішньої пластини становить 1.95 (рис.5.2.2). Тобто підібрана кількість слоїв композиційного матеріалу зовнішньої композиційної пластини та її конструкція цілком задовільняють поставлені нами вимоги.

Тип: Коэфф. запаса прочности

Единица: ul

23.04.2020, 1:04:57

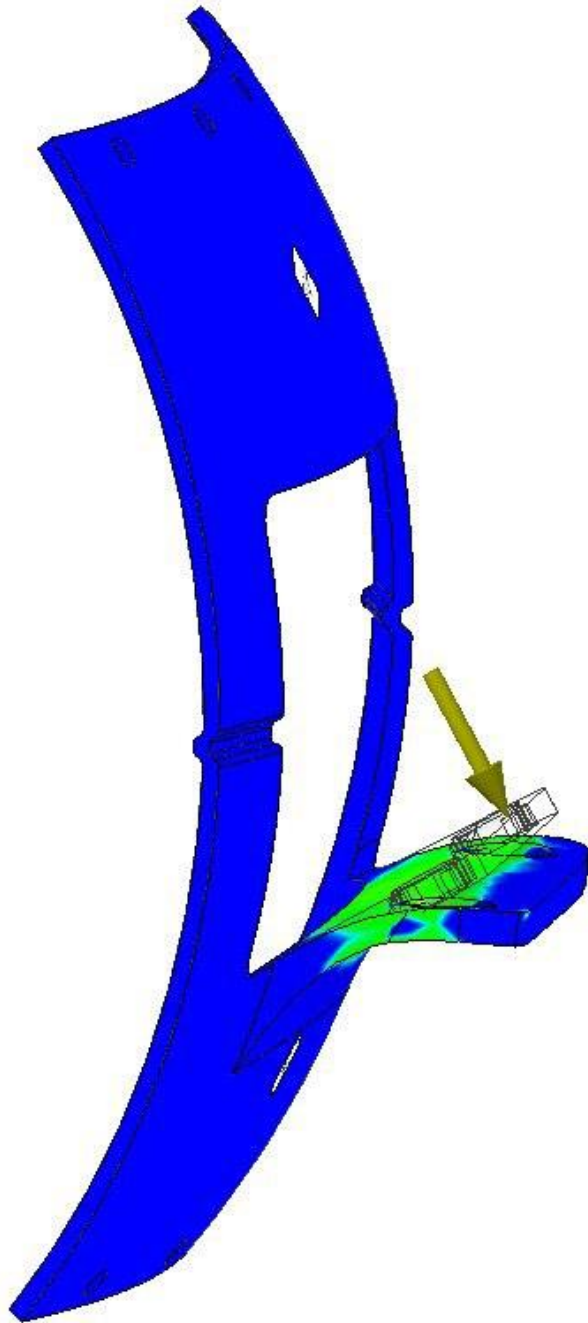
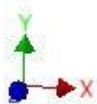
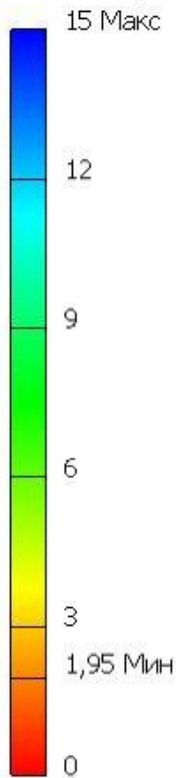


Рис. 5.2.2. Аналіз ланки на коефіцієнт міцності зовнішньої композиційної накладки

Для визначення найслабших місць в конструкції зовнішньої композиційної ланки проведемо її аналіз на зміщення що виникнуть під впливом прикладеного навантаження від ваги механізму паралельної структури для переміщення схвата. Найбільше зміщення відбувається між отворами для кріплення в крайній частині виступу ланки. Максимальне зміщення за величиною становить близько 0.05 мм (рис. 5.2.3). Величина

зміщення є досить малою для того, щоб знехтувати даним зміщенням. Тому для роботоздатності роботомеханічного комплексу спеціального призначення дана конструкція накладки є доцільною.

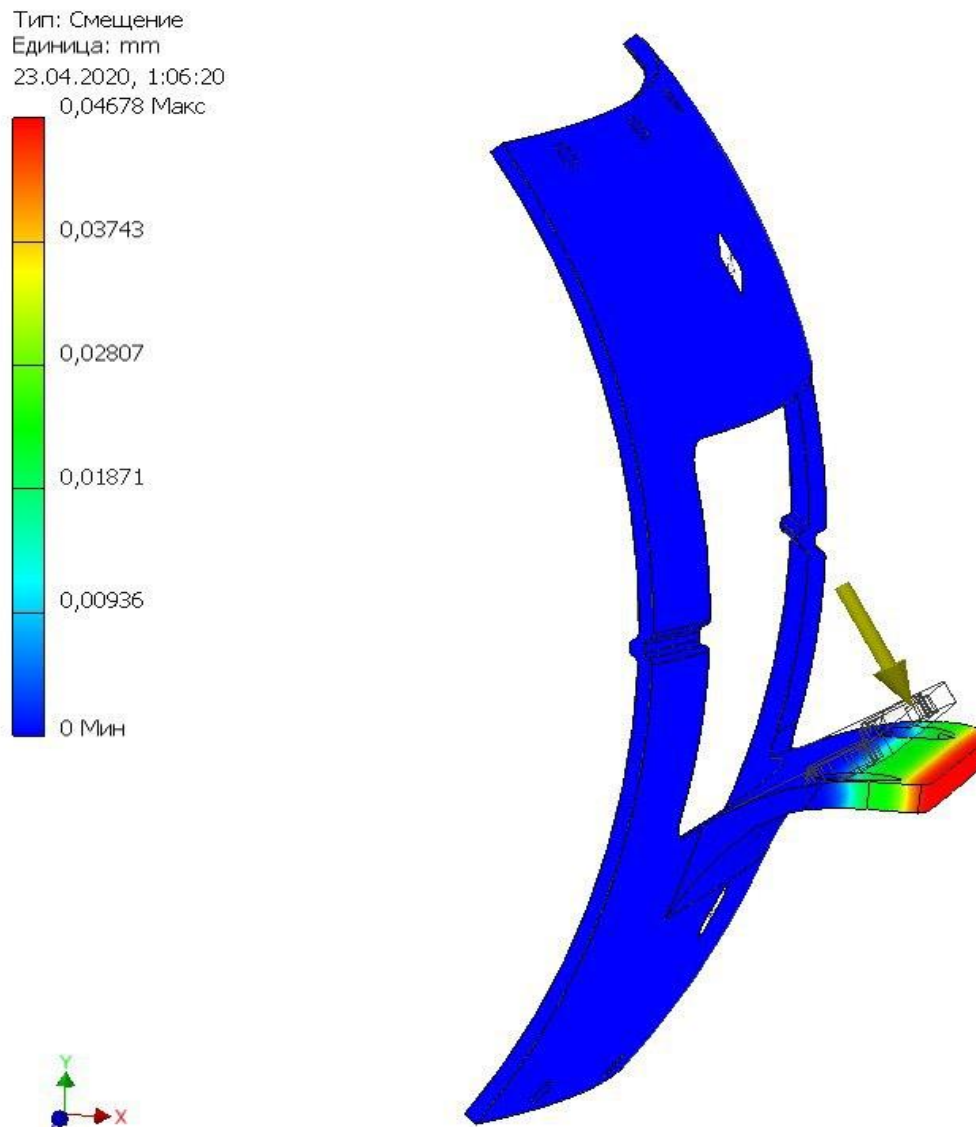


Рис.5.2.3. Аналіз зміщення зовнішньої композиційної ланки

Висновки: Конструктивне рішення перехідних вузлів від рами до крокуючої ланки представлено у вигляді кріпильних накладок. Накладки також виконані із композиційного матеріалу Style 7781, для зменшення ваги. Також між композиційною накладкою та рамою розміщені фрикційні перехідні пластинки, які передають рівномірне навантаження від накладок до рами роботизованого комплексу спеціального призначення. Сама накладка має коефіцієнт запасу 1.95, що відповідає вимозі міцності, та здатні витримати перевантаження.

РОЗДІЛ 6

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ РАМИ ТА НАКЛАДОК РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

6.1 Розробка оснати для виготовлення композиційної рами роботизованого комплексу спеціального призначення

Рама мобільного роботизованого комплексу спеціального призначення під час роботи сприймає ряд навантажень від мобільного роботизованого комплексу в цілому. На етапі проектування рами було проаналізовано ряд можливих варіантів геометричних параметрів рами та підібраний найоптимальніший із них. Також проведений аналіз підбору структури композиційного матеріалу, що буде використаний під час виготовлення рами.

Структура композиційного матеріалу рами має вигляд слоїстого композиційного матеріалу з напрямками волокон: $[0/90/+45/-45/0/90/+45/-45/+45/-45/90/0/+45/-45/90/0]$. Матеріалом для виготовлення став напівфабрикат «препрег» Style 7781 E-Glass. Причиною використання напівфабрикату при виготовленні рами, стала зручність його використання та відсутність необхідності в забезпеченні спеціального обладнання в лабораторії.

Геометричні характеристики композиційної рами роботизованого комплексу спеціального призначення представлені на рисунку. Для виготовлення рами підібрана зовнішня поверхня тора. Також виконано систему пазів для базування композиційних накладок, що забезпечують кріплення двох механізмів паралельної кінематики, а саме механізму крокування та механізму переміщення схвату, вздовж та поперек тора виконано систему пазів (рис. 6.1.1).

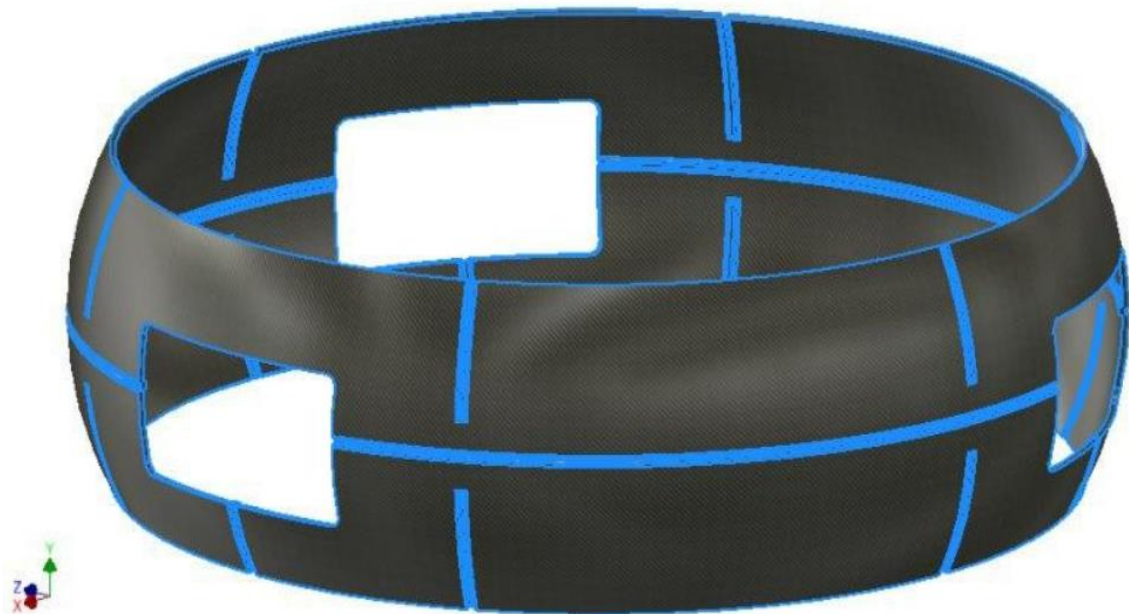


Рис. 6.1.1. Зображення геометричних параметрів рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Складність виготовлення рами тороподібної форми полягає у тому, що через складну конфігурацію даного контуру, а саме різницю у величині діаметра в залежності від висоти елемента, таку поверхню досить складно зняти із цілісної оснастки для запікання в автоклаві, не розділяючи раму на сегменти та залишивши її в цілісному вигляді.

Виготовлення композиційної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення проводиться за методом вакуумної формовки з подальшим спіканням в автоклаві.

6.1.1 Метод вакуумного формування виробів із композиційних матеріалів

Метод вакуумної формовки є одним із найпоширеніших методів виготовлення виробів довільних габаритів та форми. Найчастіше у серійному виробництві, даний метод використовується для виготовлення пластикових елементів. Процес вакуумної формовки не є складним, але потребує уважності при роботі та гарної підготовки. Також, однією з

головних переваг при вакуумному формуванні, є відсутність швів на вихідних виробах.

Для вакуумної формовки рами необхідно виготовити форму для викладення композиційного матеріалу, у нашому випадку напівфабрикату препрег, щоб після термообробки в автоклаві він набув тороподібної форми. Для підбору найдоцільнішого методу виготовлення композиційної рами варто врахувати те, що у нашому випадку, це одиничне виробництво.

Одним із варіантів використання матеріалу для виготовлення оснастки стала кераміка. Даний матеріал витримує температурні режими спікання, також легко піддається формуванню. Недоліком є те, що процес затвердівання має проходити під впливом високої температури, що може спричинити до плавлення друкованої рами, що виконана по технології 3D друку (рис. 6.1.1.1).

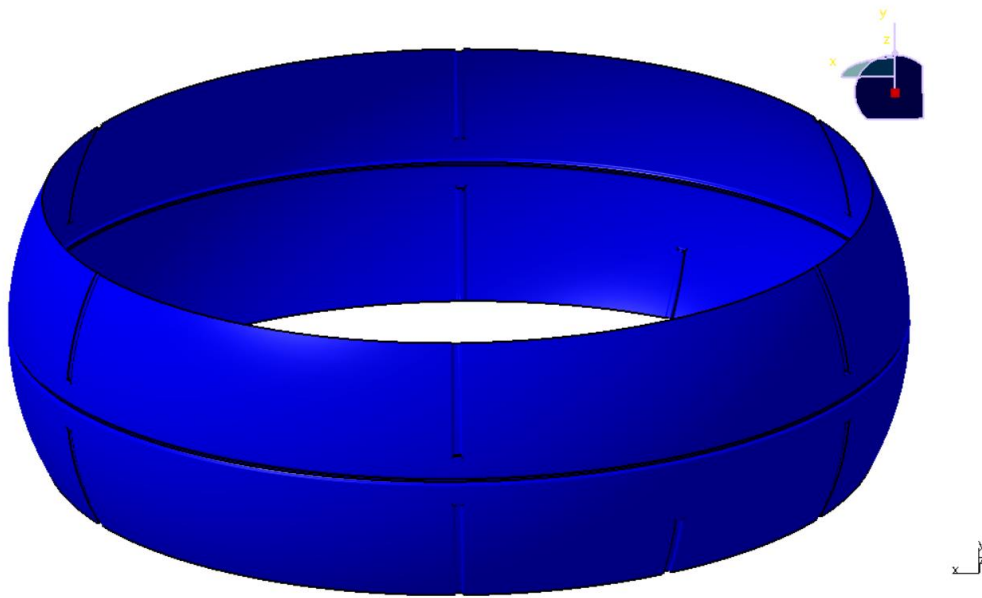


Рис. 6.1.1.1. Модель композиційної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення для 3D друку

Наступним матеріалом для виготовлення оснастки майбутньої рами став гіпс. Даний матеріал є досить поширеним у використанні починаючи від медичної галузі, наприклад стоматології та закінчуючи широким вибором для різноманітних будівельних робіт. Гіпс також використовують

на підприємствах по виготовленню керамічних виробів у якості формуючого матеріалу. Процес застигання може відбуватися і без температурного впливу, тому даний варіант є найоптимальнішим для нас.

Оснасткою для викладення препрегу стане гіпсова болванка, поверхня якої точно копіює внутрішню поверхню рами. Для виготовлення такої оснастки, нам необхідно залити гіпсовий розчин в середовище, яке буде відповідати точну геометрію внутрішньої поверхні рами. Таким середовищем стане надрукована на 3D принтері копія рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення (рис. 6.1.1.2).

Модель рами має бути без отворів для запобігання витікання гіпсового розчину із форми. Враховуючи складність та вартість друку великогабаритних елементів, таких як рама, виконаємо друк її сегментів. Надруковані сегменти рами, які за допомогою термообробки (спаювання) та їх викладки, утворюють одну цілісну структуру, що стане середовищем для заливки розчину гіпсу.

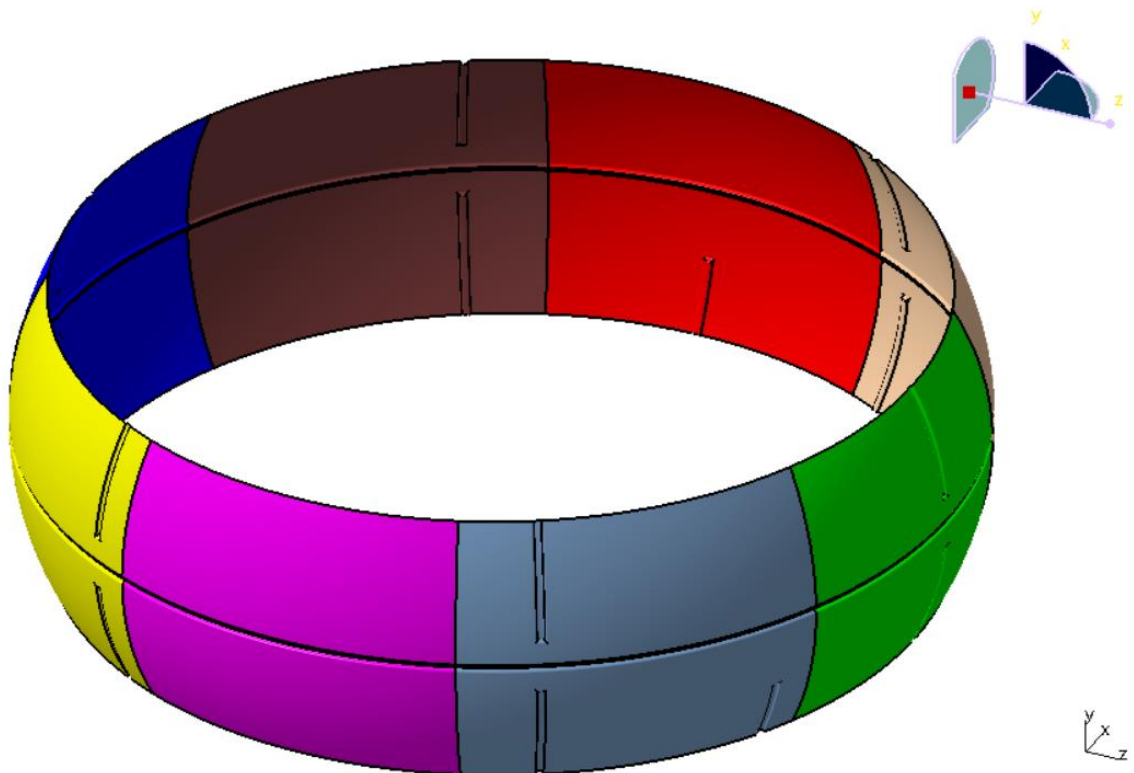


Рис. 6.1.1.2. Модель сегментованої рами для 3D друку

Перед заливкою гіпсового розчину, внутрішню поверхню, що утворена методом 3D друку варто покрити кремнеорганічним антиадгезійним покриттям (рис. 6.1.1.3). Таке покриття забезпечить просте роз'єднання оснастки та готового елемента без поверхневого пошкодження рами роботизованого комплексу спеціального призначення.

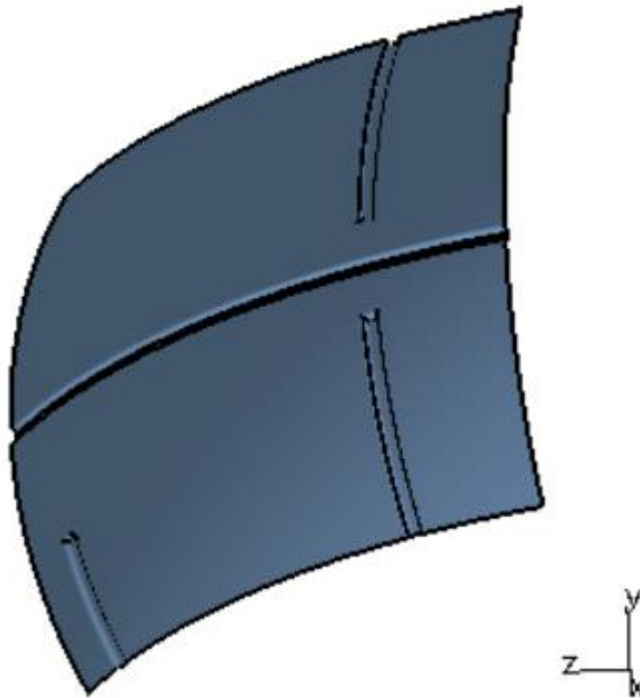


Рис. 6.1.1.3. Друкований сегмент композиційної рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення із кремнеорганічним антиадгезійним покриттям

Гіпсовий розчин після виливки в друковану сегментну форму спричинить високий тиск на внутрішню поверхню друкованої сегментної рами, що може призвести до появи тріщин на поверхні друкованої рами. Найуразливішими місцями стануть лінії спайки та зони біля них. Тому для запобігання появи тріщин, ще перед етапом заливки гіпсового розчину у форму, помістимо пластикову сегментну друковану раму в спеціальну зовнішню циліндричну болванку.

Болванка представляє собою листовий матеріал, краї якого з'єднані між собою, щоб створити циліндричну поверхню. Метод з'єднання країв не відіграє важливої ролі, тому робочі, на місці роботи можуть підібрати зручний для них спосіб. Діаметр зовнішньої циліндричної поверхні зовнішньої болванки становить 1365 мм, для забезпечення простоти установки зовнішньої циліндричної болванки до друкованої сегментної рами та забезпечення зовнішньою циліндричною болванкою підтримання друкованої сегментної рами під час заливки гіпсовим розчином. Матеріалом такої циліндричної болванки став листовий матеріал сталі (рис. 6.1.1.4).

Для зменшення ваги гіпсової оснастки, до внутрішньої частини рами поміщаємо ще один елемент — внутрішню циліндричну болванку. Це також призведе до економії гіпсового матеріалу. Внутрішня циліндрична поверхня має діаметр 1000 мм (рис. 6.1.1.4). Даний елемент також встановлюється перед процесом заливки гіпсового розчину, з попередньо нанесеним покриттям на зовнішній поверхні для легкого роз'єднання елементів після затвердіння. Таким покриттям може слугувати шар звичайного мила. Також після процесу термообробки в автоклаві, внутрішня циліндрична легко знімається.

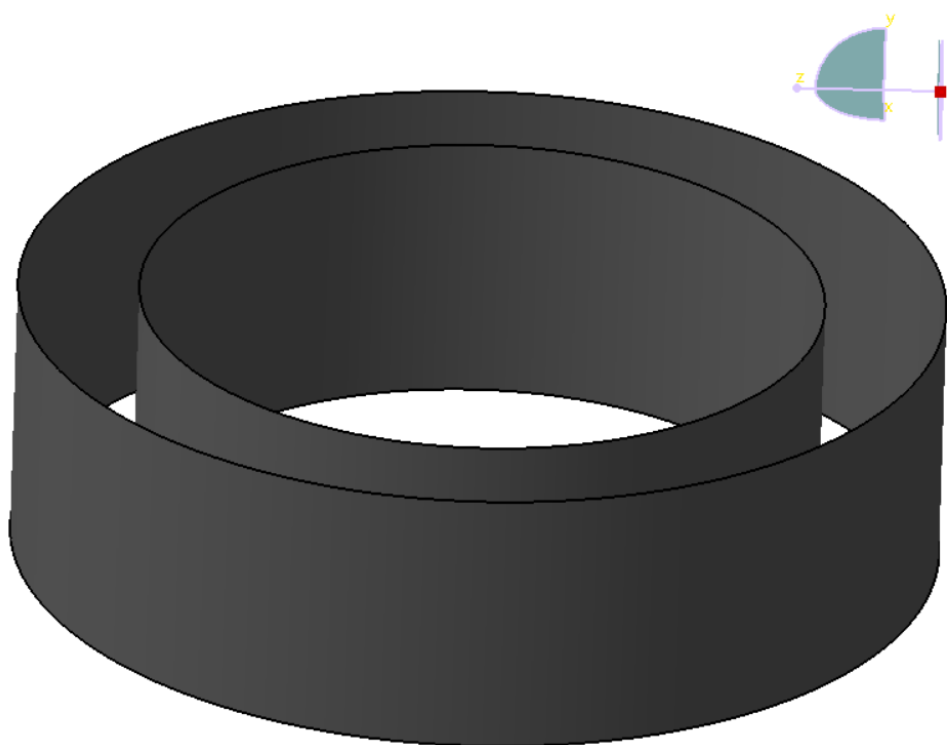


Рис. 6.1.1.4. Модель зовнішньої та внутрішньої циліндричних болванок для підтримання друкованої сегментної рами роботизованого комплексу спеціального призначення

Для запобігання створення повітряних раковин, гіпс варто підібрати мілкодисперсний. Також для того, щоб зменшити вірогідність утворення повітряних раковин, заливку гіпсового розчину проводимо на спеціальній вібромашині. Під час роботи відбромашини, бульбашки повітря, що знаходяться в гіпсовому розчині, будуть підніматися під дією вібрації будуть підніматися догори. Робота з гіпсовими розчинами потребує швидкості дій під час процесу виготовлення оснастки, адже гіпс досить швидко затвердіває.

Такі циліндричні вставки не є жорсткими, тому для надання жорсткості конструкції після заливки та під час роботи відбромашини, встановимо у внутрішню болванку раму для підвищення жорсткості (рис.6.1.1.5).

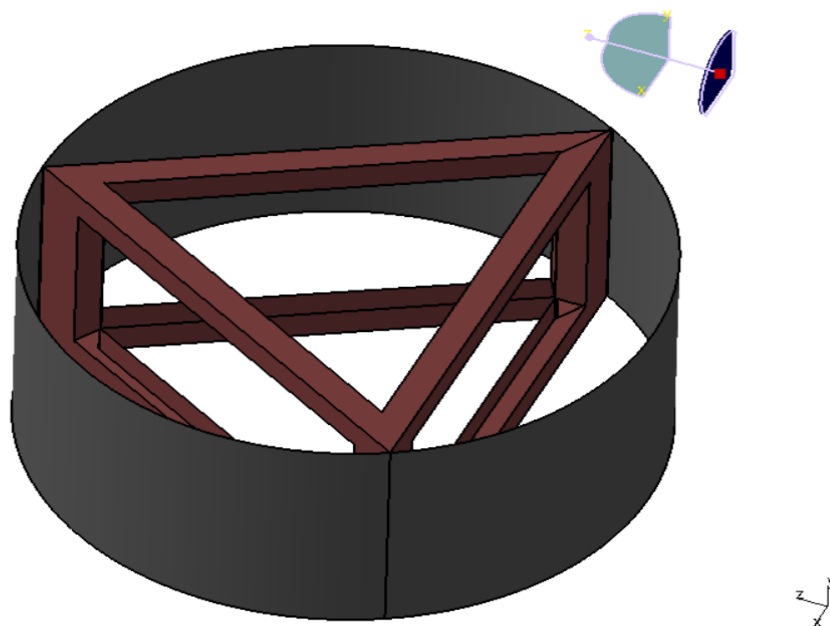


Рис. 6.1.1.5 Модель внутрішньої циліндричної болванки та рами

Після затвердіння гіпсу, необхідно позбутися циліндричних болванок та пластикової друкованої рами. Пластиковий макет рами можна

зняти після температурного впливу на неї, нагріваємо шви та розпаюємо їх. Всі шви розпаювати не потрібно, вистачить 2 чи 3. Повний набір оснасток для виготовлення композиційної рами робототехнічного комплексу спеціального призначення зображено на рисунку 6.1.1.6.

Отже після виконання ряду маніпуляцій ми отримали гладку внутрішню поверхню, яку можна використовувати для викладки препрегу (рис. 6.1.1.7).

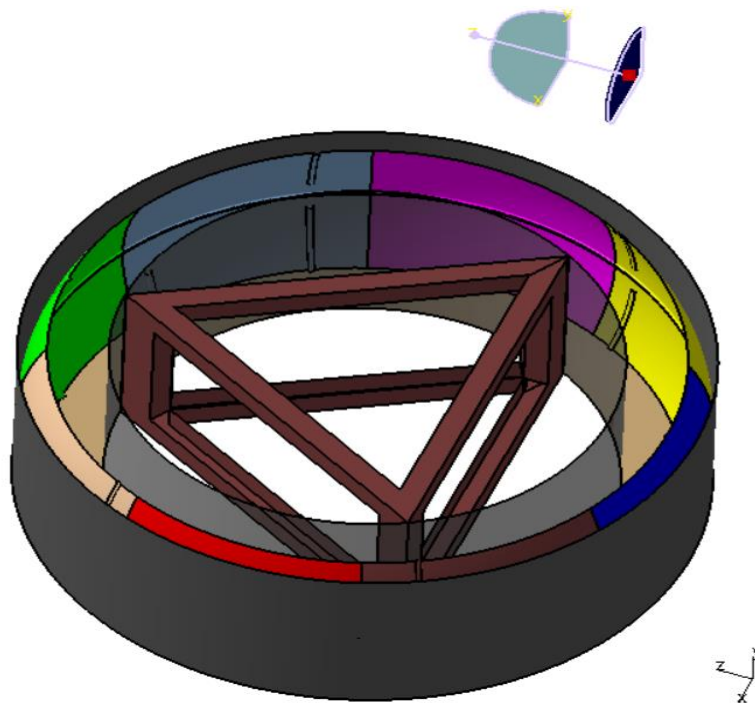


Рис. 6.1.1.6. Повний набір оснасток для виготовлення композиційної рами робототехнічного комплексу спеціального призначення

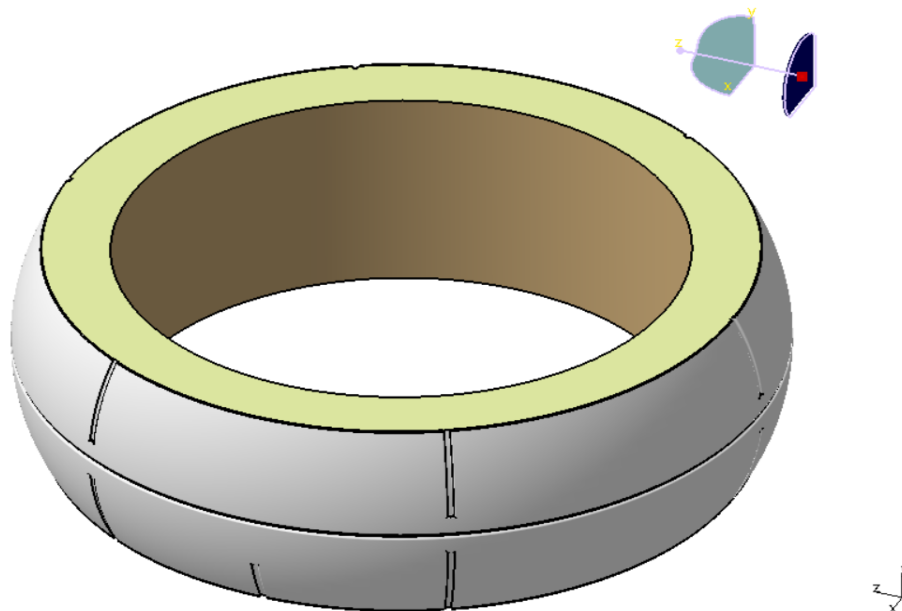


Рис. 6.1.1.7. Модель гіпсової заготовки для викладки препрегу.

Препрег Style 7781 (E-glass) постачається у вигляді рулонів розмірами: ширина 100 см, довжина 20 м і більше. Тому першим етапом є підрізання напівфабрикату по габаритам розгортки.

Наступним етапом є оброблення поверхні гіпсової оснастки кремнеорганічним антиадгезійним покриттям для того, щоб в подальшому забезпечити уникнення спікання гіпсової оснастки та композиційної рами спеціального призначення разом, адже процес роз'єднання цих елементів може пошкодити поверхню для викладки.

Оскільки структура волокон слоїв композиційного матеріалу, що ми використовуємо має вигляд $[0/90/+45/-45/0/90/+45/-45/-45/+45/90/0/-45/+45/90/0]$, а структура препрегу Style 7781 виглядає так $[0/90/+45/-45]$, то використаємо 4 слоя препрегу. Звільнивши рулони препрегу від захисних плівок, складемо їх попарно та дві пари складемо дзеркально один одному. Отримавши структуру $[0/90/+45/-45/0/90/+45/-45/-45/+45/90/0/-45/+45/90/0]$, виконаємо ручну викладку на поверхню гіпсової оснастки (рис. 6.1.1.8).

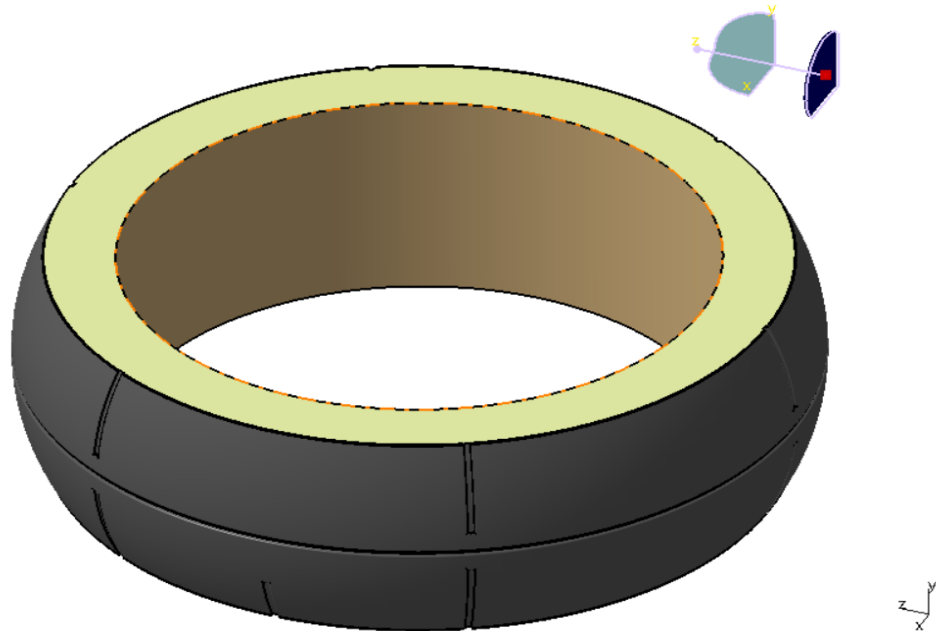


Рис. 6.1.1.8. Модель ручної викладки препрегу Style 7781 на поверхню гіпсової оснастки

Після ручної викладки препрегу Style 7781 на гіпсову оснастку, необхідно провести розгладжування поверхні препрегу на гіпсовій оснастці, щоб позбавитися від повітряних бульбашок по її поверхні.

Покриту препрегом оснастку окутуємо в спеціальну целофанову плівку для вакуумізації, наприклад плівка PA205, та у місцях розриву плівки, використовуємо герметизуючу стрічку, таким способом формуючи вакуумний мішок.

Вакуумний мішок має один отвір для розміщення трубки шлангу, що в свою чергу з'єднаний із вакуумним насосом. На зону переходу від шлангу до мішка варто також розмістити герметизуючу стрічку для усунення місць проникнення повітря до порожнини мішка під час роботи насоса та кращого всмоктування повітря із мішка. Після створення насосом зони пониженого тиску в целофановому мішку, накладений на поверхню гіпсової оснастки препрег повторить її контур.

6.1.2 Метод запікання в автоклаві виробів із композиційних матеріалів

Після проведення вакуумізації, що призвело до надання препрегу тороподібної форми рами, необхідно провести матрицю препрегу в твердий

стан. Для цього проведемо спікання в автоклаві. Автоклав використаємо «FORMULA-1-O» (рис. 6.1.2.1).

Характеристики автоклава:

- Діаметр від 1 200 до 5 000 мм;
- Довжина від 2 000 до 20 000 мм;
- Тиск 10 бар;
- Температура до 250°C;
- Оснащення системою вакуумних мішків



Рис. 6.1.2.1. зображення автоклава «FORMULA-1-O»

Розміщуємо оснастку із викладеним препрегом до автоклаву використовуючи систему вакуумних мішків для підтримання форми виробу під час термообробки.

У герметично зачиненому автоклаві проводять процес спікання, який відбувається за три етапи: етап нагрівання, етап підтримки температури та етап охолодження.

Етап нагрівання відбувається за два заходи: повільний і швидкий. Температурний нагрів стартує від позначки кімнатної температури та

регулярно росте із невеликим приростом температурних показників. Під час температурного росту проводиться набір тискових переходів, це необхідно для того, щоб матриця прогрівалася та затвердівала рівномірно. Процес повільного зростання температури в автоклаві для нашої рами займе близько 90 хвилин.

Приближаючись до температури 180°C , спікання відбувається вже при різкому підвищенні температури, вмикаються всі тени автоклава і температура всередині автоклава росте до $200\text{-}210^{\circ}\text{C}$.

Другий етап запікання композиційного матеріалу відбувається за сталої температури. Після підняття температурного показника до 200°C , температура ще певний час тримається при даному показнику. Процес підтримки температури на рівні $200\text{-}210^{\circ}\text{C}$ в автоклаві для нашої рами займе близько 25-30 хвилин. Етап підтримки сталої температури в автоклаві є найменш тривалішим за всі інші.

Третій етап запікання композиційних матеріалів в автоклаві відбувається при поступовому зменшенні температурного показника. Температуру в автоклаві скидають до поділки 120°C та підтримують ще 2-3 години. Під час проведення даного етапу, не проводять тискові перепади в автоклаві, адже матриця виробу вже затверділа. За цей час матриця поступово рівномірно висихає.

Після проведення трьох етапів запікання композиційних матеріалів, виріб залишають відстоятися, для того, щоб звільнитися від внутрішнього напруження після термообробки. Даний етап є найбільш часозатратнішим серед всіх інших, адже може тривати від декількох днів, до декількох тижнів.

Завершальним етапом виготовлення композиційної рами роботизованого комплексу стане механічна обробка. У рамі необхідно виконати три паза для встановлення механізму переміщення схвату, який працює за принципом паралельної кінематики.

Пази вифрезеруються вручну портативним буром з дисковою прорізною фрезою (рис. 6.1.2.2).



Рис. 6.1.2.2. Зображення готового виробу композиційної рами

Виготовлення рами способами вакуумізації та запеченні в автоклаві, забезпечили високу якість виробу.

6.2 Розробка оснастки для виготовлення композиційних накладок для рами роботизованого комплексу спеціального призначення

Композиційні накладки також як і рама роботизованого комплексу спеціального призначення виготовлятимуться методом вакуумізації та запікання в автоклаві.

Оснастка для виготовлення накладок відрізнятиметься геометричною конфігурацією від оснастки для виготовлення рами. Матеріал як і при виготовлення рами використовуватиметься гіпс, але метод надання гіпсовій оснастці форми накладки відрізнятиметься, адже накладки не утворюють цілісної замкненої структури, куди б можна було вилити гіпсовий розчин.

Виготовимо внутрішню композиційну накладку за методом 3D друку. Створення гіпсової оснастки проводимо методом накладання шарів гіпсу на контур друкованого елемента накладки. Після викладення кожного шару

виділяємо час на затвердіння гіпсу. Після виготовлення гіпсової оснастки, необхідно покрити її кремнеорганічним антиадгезійним покриттям, для запобігання подальшого запікання оснастки та композиційного матеріалу.

Перейшовши до етапу викладки препрега на оснастку спочатку необхідно підрізати препрег по формі оснастки. Після цього препрег звільнюємо від захисних плівок та викладаємо дзеркально попарно. Спочатку викладаємо одну пару зі структурою $[-45/+45/90/0/-45/+45/90/0]$. У місці кріплення штанг механізму паралельної структури необхідно виконати потовщення матеріалу, адже найбільша кількість навантаження буде зосереджена саме там. Для цього виконаємо композиційну вставку зі структурою $[0/90/+45/-45/-45/+45/90/0]$ та гумову вставку для забезпечення плавної зміни контуру.

Спочатку викладається гумова вставочка, потім поверх неї викладається композиційна. Для забезпечення тісного контакту поверхонь вставок та накладки і позбавлення повітряних раковин, варто гарно здавити дану структуру. Поверх такої структури накладаємо ще одну пару препрега зі структурою $[0/90/+45/-45/0/90/+45/-45]$ та поміщаємо у вакуумні мішки для надання форми препрегу рами та забезпечення кращого зчеплення між слоями.

Виймаємо препрег із оснасткою із вакуумних мішків для виконання отворів під кріплення штанг змінної довжини та отворів для болтових з'єднань. Два глухих отвори для кріплення штанг виконуємо за допомогою гострого трубчастого інструменту. В отвори поміщаємо стакани. У стаканах виконано паз, який під час підвищення температури в автоклаві надає змогу металу, з якого виконаний стакан розширятися. Після встановлення стаканів виконуємо ряд отворів під болтові кріплення та встановлюємо туди втулки, які як і стакани, виконані з пазами. Після проведених дій, поміщаємо викладений препрег з втулками та оснасткою до вакуумних мішків у автоклав. Та відкачуємо повітря для проведення вакуумізації.

Виготовлення зовнішньої композиційної накладки подібне на процес виготовлення внутрішньої композиційної накладки крім декількох елементів. Наприклад, виготовлення зовнішньої композиційної накладки не потребує використання гумової вставки, також виконання отворів під кріплення штанг змінної довжини є наскрізним, що полегшує завдання виконання отворів для робочого. Також для даних отворів використовуватимуться не стакани, а втулки, які легше виготовити. Тому процес виготовлення зовнішньої композиційної накладки є спрощеним відносно процесу виготовлення внутрішньої композиційної накладки.

Наступним етапом стане термообробка в автоклаві. Процес запікання препрегу рами проходитиме ідентично і для накладок, тому варто розглянути варіант одночасного їх спікання в автоклаві.

Висновок: для реалізації процесу виготовлення композиційної рами роботизованого комплексу та накладок рами використаємо методи надання форми та забезпечення затвердіння матриці композиційного матеріалу. Форма виробами надається методом вакуумної формовки за допомогою спеціальної гіпсової оснастки. Затвердіння матриці композиційного матеріалу відбувається за методом запікання в автоклаві при обов'язковому встановленому температурному режимі.

РОЗДІЛ 7

ОПИС КОНСТРУКЦІЇ МОБІЛЬНОГО РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Мобільний роботомеханічний комплекс спеціального призначення за його функціонуванням умовно можна поділити на дві частини: нижня крокуюча частина та верхня частина маніпулятора (рис. 7.1).

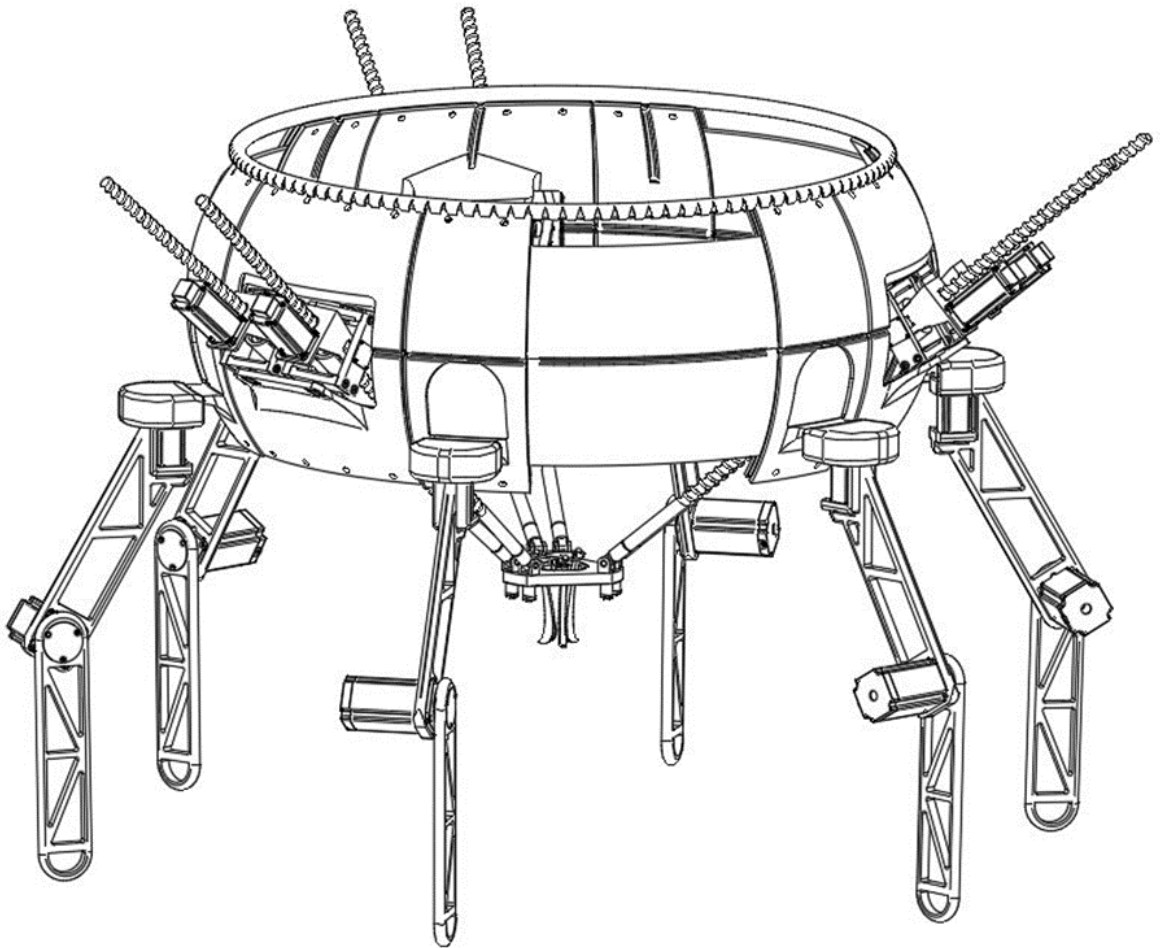


Рис.7.1. Модель роботомеханічного комплексу спеціального призначення

До верхньої частини належать наступні елементи: композиційна рама роботомеханічного комплексу спеціального призначення (1), зовнішня фрикційна перехідна металева пластина (2), внутрішня фрикційна перехідна металева пластина (3), гумова вставка для болтового кріплення (4), Зовнішня композиційна накладка (5), внутрішня композиційна накладка (6), болтові кріплення (7), дискретні крокові електродвигуни (8), штанги змінної

довжини (9), гіроскопічні рамки для штанг змінної довжини (10), схват (11) (рис. 7.2).

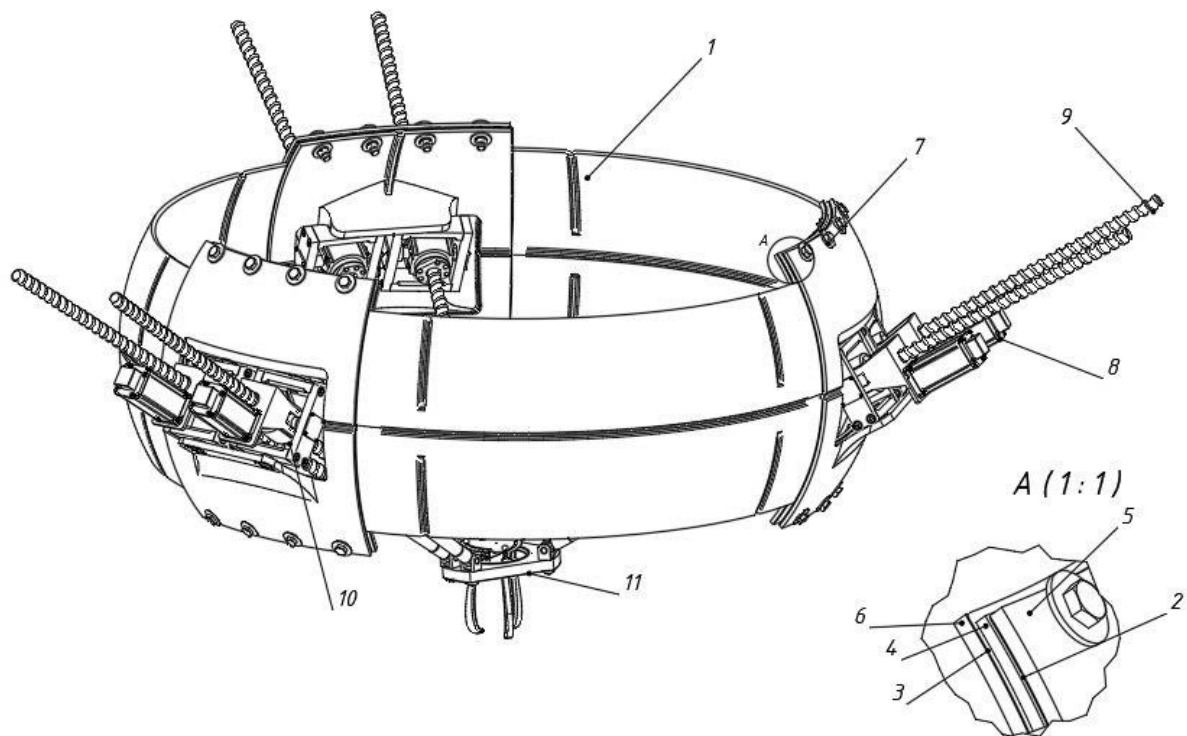


Рис. 7.2 Зображення верхньої частини роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Дискретні крокові двигуни з шківом із зубчасто-пасовою передачею розміщено для передачі крутного моменту від привода. Також, частину передачі гвинт-гайка, а саме гайку, закріплену в стакані, що кріпиться із внутрішньою опорою установки. Штанги змінної довжини, кріпляться до рами маніпулятора, на який встановлюється схват. Механізм переміщення схвату представляє собою механізм, що працює за принципом паралельної кінематики з шістьма ланками— гексапод. Штанги механізму, що працює за принципом паралельної кінематики під час роботи сприймають лише навантаження на стиск-розтяг. Регулювання кутового нахилу рами відносно площини поверхні переміщення відбувається з рахунок роботи крокуючих елементів.

До нижньої крокуючої частини належить шість крокуючих ланок та композиційні накладки для кріплення крокуючих ланок до рами роботомеханічного комплексу спеціального призначення. Кожна крокуюча ланка представлена: верхньою частиною крокуючої ланки «бедро» (12), нижню частину крокуючої ланки «голінь» (13), верхній дискретний кроковий двигун (14), фланець для кріплення крокуючої ланки до композиційної накладки (15), пластикова захисна кришка для верхнього дискретного серводвигуна (16), пластикова захисна кришка для нижнього дискретного серводвигуна (17), нижній кроковий двигун (18), вал-зірочка для передачі крутного моменту від нижнього дискретного крокового двигуна (19), гумові вставки (20) та болтові кріплення (21).

Верхній та нижній елементи крокуючої ланки, «бедро» та «голінь», представлені собою у вигляді рами (рис. 7.3). Така конструкція забезпечує ланку здатністю витримувати високі навантаження при невеликій вазі. Матеріалом для виготовлення рам лапок став сплав алюмінію АМ5.

Варто звернути особливу увагу на конструкцію нижнього вузла кріплення «голені» та «бедра». Така будова вузла запозичена із патентку «Крокуючий пристрій мобільного робота» №120668.

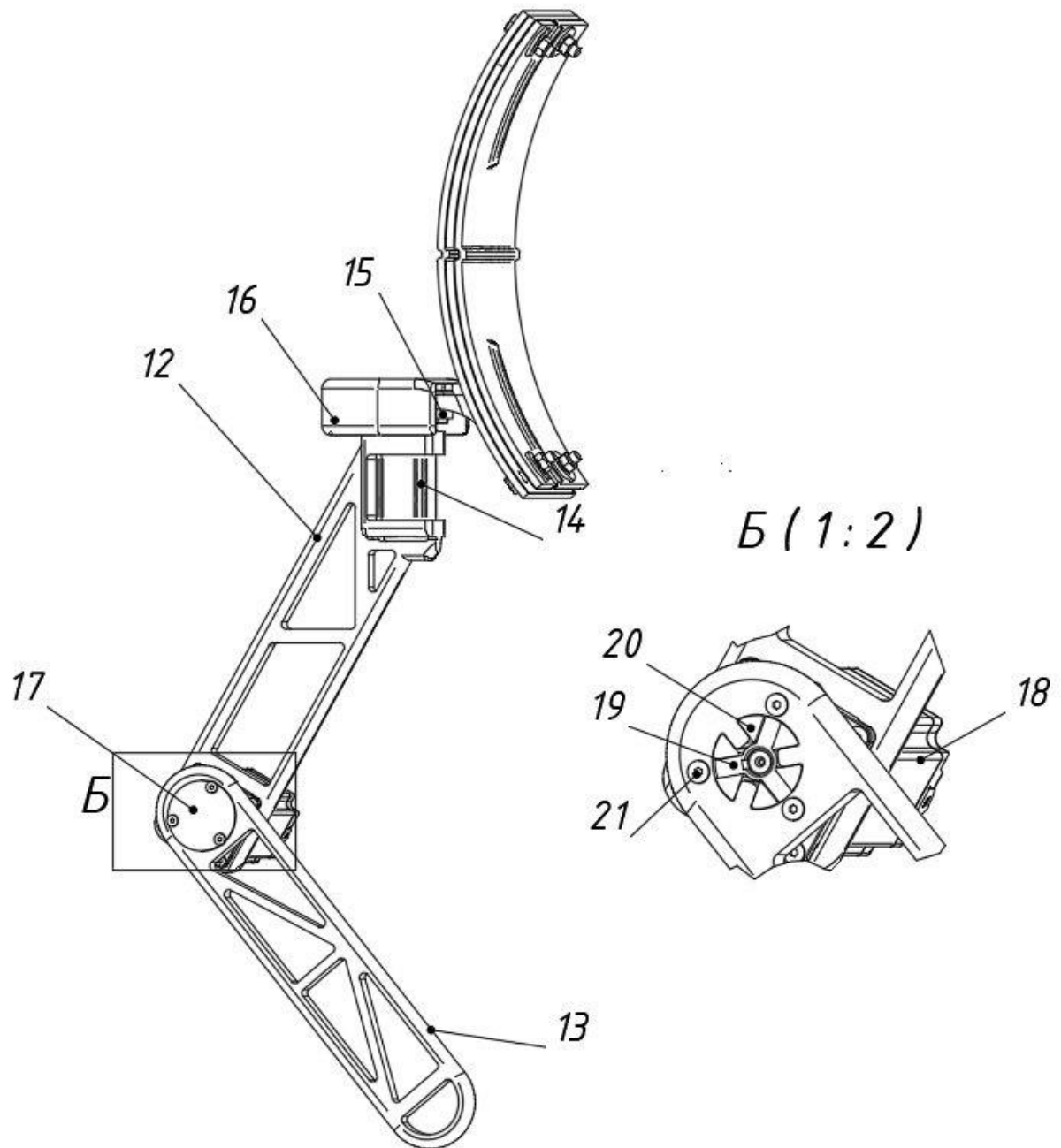


Рис. 7.3 Схема конструкції крокуючої ланки

Верхній та нижній елементи крокуючої ланки, «бедро» та «голінь», з'єднані між собою дискретним кроковим електроприводом, та спеціальним торсіоном, де нижня частина ланки відносно верхньої має робочий кут величиною 40° (рис. 7.4).

Крокуюча ланка з'єднана із композиційними накладками також через дискретний кроковий двигун та фланець, що забезпечують переміщення

крокуючої ланки вперед та назад відносно роботомеханічного комплексу спеціального призначення.

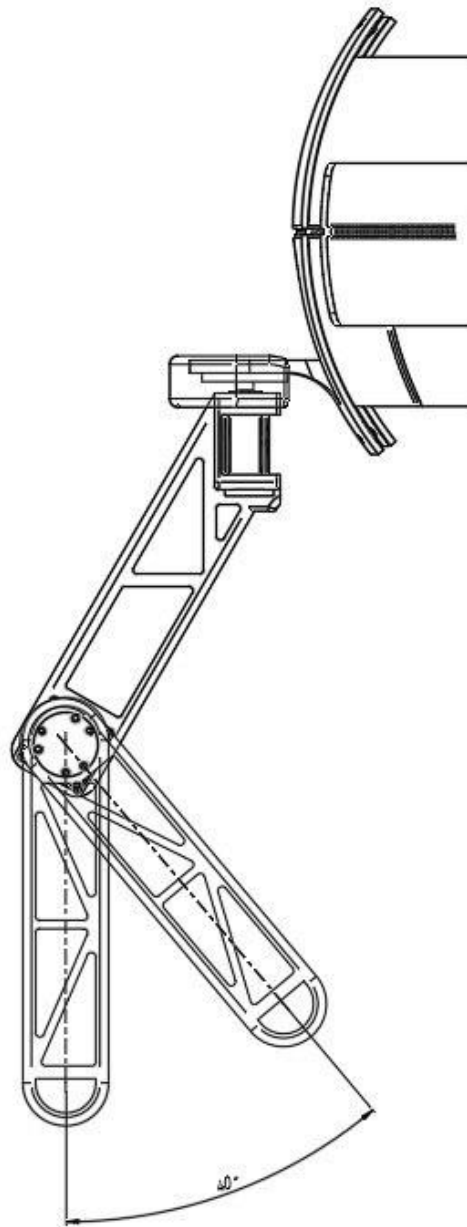


Рис. 7.4 Зображення робочого кута нижньої частини крокуючої ланки «голені» роботомеханічного комплексу спеціального призначення

Висновок: виконана модернізація роботизованого комплексу спеціального призначення. Модернізація стосується системі переміщення «гексапод», а саме шести крокуючим ланкам, забезпечують переміщення роботизованого комплексу спеціального призначення.

ВИСНОВКИ

1) Виходом із ситуації стало створення нової рами роботизованого комплексу спеціального призначення. Механізм переміщення представлений у вигляді структури, що працює за принципом паралельної кінематики «гексапод». Дана структура забезпечує шість ступенів вільності рами роботизованого комплексу спеціального призначення, що істотно збільшує робочу зону маніпулятора.

2) Виконаний підбір композиційного матеріалу для виготовлення рами та накладок роботизованого комплексу спеціального призначення. Оптимальним матеріалом для їх виготовлення став напівфабрикат препре «Style 7781», армуючі волокна якого представлені скловолокном, а матрицею виступає епоксидна смола.

3) Виконані розрахунки структури композиційного матеріалу для виготовлення рами та накладок роботизованого комплексу спеціального призначення. Для рами структура має вигляд: $[0/90/+45/-45/0/90/+45/-45/-45/+45/90/0/-45/+45/90/0]$. Для накладок структура має вигляд: $[0/90/+45/-45/0/90/+45/-45/-45/+45/90/0/-45/+45/90/0]$ і в деяких випадках з використанням гумових вставок.

4) Виконано підбір геометричного профілю композиційної рами роботизованого комплексу спеціального призначення. Найоптимальнішим варіантом стала зовнішня поверхня тора, яка мала високу міцність, хорсткість та малу вагу.

5) Виконані розрахунки напружено-деформованого стану рами роботизованого комплексу спеціального призначення та її накладок, від навантаження, що сприймаються ними від ваги крокуючих ланок та механізму переміщення схвата. Результат підтвердив високу міцність рами та накладок і спроможність витримувати прикладене навантаження без пошкоджень.

6) Проведено розробку оснасток для виготовлення композиційних рами та накладок. Матеріалом для створення оснастки обрано гіпс.

7) Для надання форми композиційній рамі та накладкам, використовуємо метод вакуумної формовки.

8) Для затвердіння матриці композиційного матеріалу, використовуємо метод запікання в автоклаві. Для виготовлення композиційної рами та накладок створено часову схему термічної обробки.

9) Крокуючі механізми мають характерний недолік, а саме дискретність рухів, що обумовлено жорсткою конструкцією крокуючих ланок та низькою енергоефективністю, що пов'язана із відсутністю рекуперації енергії, яка підводиться до приводів.

10) Як висновок в одному із вузлів крокуючої ланки, використана схема крокуючого пристрою мобільного робота заявки на винахід (МПК (2018.01) B62D 57/032). У вузлі використано демфер у вигляді торсіону, який надає плавності руху крокуючій ланці.

Література

1. <https://studfile.net/preview/5427910/page:38/>
2. Патент України №120668
3. http://k403.khai.edu/uploads/editor/36/9334/sitepage_27/files/proektirovanie_i_konstruirovanie_izdeliy_iz_km_teoriya_i_praktika.pdf
4. Глубокий, В. И. Конструирование и расчет станков. Расчет приводов подач и направляющих : методическое пособие к практическим занятиям для студентов машиностроительных специальностей / В.И. Глубокий, А. М. Якимович, А. С. Глубокий. – Минск : БНТУ, 2013. – 97 с.
5. https://stud.com.ua/73781/tehnika/kompozitsiyini_materiali
6. Малярчук А.О. Приводи металорізальних верстатів та автоматизованою устаткування. Електропривод. Лабораторний практикум: Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2001. – 68 с.
7. Системы автоматизированного управления электроприводами: Учеб. пособие / Г.И.Гульков, Ю.Н.Петренко, Е.П.Раткевич, О.Т.Симоненкова; Под общ. ред. Ю.Н.Петренко. – Мн.: Новое знание, 2004. – 384 с.
8. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25936/3/Kolomiiets_magistr.pdf
9. Патент Російської Федерації, № 2356775, МПК В62D 57/032. Шагающий вездеход / Алиев А.С., Алиев С.А., заявка №2007118031/11 від 14.05.2007, Опубл. 27.05.2009.
10. <https://studfile.net/preview/5427910/page:38/>
11. Патент України, № 75991, МПК В25J 11/00, В62D 57/00. Крокующий рушій малогабаритного робота / Шевченко А. І., Полівцев С. О., заявка №20040604331 від 04.06.2004, Опубл. 15.06.2006.
12. Патент Російської Федерації, № 2642020, МПК В62D 57/032. Шагающее устройство / Артамонов Ю. П., Близнец Д. П., Близнец М. П., Близнец П. М., Бошляков И. А., Коновалов К. В., Лапшов В.С., Метасов И.Е., заявка №2016125318 від 24.06.2016, Опубл. 23.01.2018.
13. <https://www.ktb-group.com.ua/ru/pro-kompaniiu/blog/shcho-take-kompoziti-ta-tekhnologiyi-obrobki>